

ANSYS仿真分析系列丛书

ANSYS

工程结构数值分析 方法与计算实例

第1分册：建模方法、结构计算与温度场计算、设计优化

◎石彬彬 张永刚 等 编著

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

ANSYS 仿真分析系列丛书

ANSYS 工程结构数值分析 方法与计算实例

第 1 分册:

建模方法、结构计算与温度场计算、设计优化

石彬彬 张永刚 等 编著

中国铁道出版社

2015年·北京

内 容 简 介

本书为《ANSYS 工程结构数值分析方法与计算实例》的第 1 分册,包括正文 11 章及 1 个附录。本分册的内容涉及 ANSYS 结构分析的基础知识、建模方法、结构分析、温度场分析及结构优化设计等方面,系统介绍了工程结构分析及热分析的理论背景、ANSYS 软件的操作要点和建模方法、各类单元的应用要点、结构分析边界条件及载荷、结构计算结果分析与验证评价、温度场分析的边界条件与载荷、稳态及瞬态温度场分析、热应力分析、结构优化设计等问题。

本书适合作为理工科相关专业的研究生及高年级本科生学习有限元分析及 ANSYS 数值分析技术课程的参考书,也可作为从事工程结构分析的技术人员学习和应用 ANSYS 软件的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

ANSYS 工程结构数值分析方法与计算实例. 第 1 分册,建模方法、
结构计算与温度场计算、设计优化/石彬彬等编著. —北京:
中国铁道出版社,2015. 10

(ANSYS 仿真分析系列丛书)

ISBN 978-7-113-20933-9

I. ①A… II. ①石… III. ①工程结构—有限元分析—
应用软件 IV. ①TU3-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 212766 号

ANSYS 仿真分析系列丛书

ANSYS 工程结构数值分析方法与计算实例

书 名: 第 1 分册:建模方法、结构计算与温度场计算、设计优化
作 者:石彬彬 张永刚 等

策 划:陈小刚

责任编辑:王 健

编辑部电话:010-51873162

封面设计:崔 欣

责任校对:王 杰

责任印制:郭向伟

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街 8 号)

网 址:<http://www.tdpress.com>

印 刷:北京铭成印刷有限公司

版 次:2015 年 10 月第 1 版 2015 年 10 月第 1 次印刷

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:21 字数:528 千

书 号:ISBN 978-7-113-20933-9

定 价:50.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:(010)51873174(发行部)
打击盗版举报电话:市电(010)51873659,路电(021)73659,传真(010)63549480

前 言

ANSYS 作为著名的大型结构分析软件,因其功能的通用性、建模计算的高效性及计算结果精确可靠等特点,成为目前国内工程计算领域应用最广泛的分析软件,在工程计算及研究领域发挥了重要作用,大部分高校的工科专业都把 ANSYS 作为有限元分析课程的教学软件。但是另一方面,ANSYS 毕竟是一个复杂的工程分析系统,熟练掌握其建模和分析技术并不是一件轻松的事情。很多技术人员感觉在学习 ANSYS 时缺少系统的理论指导和可参考的典型算例,客观上造成学习周期长,使用软件时问题和疑惑较多,对于计算结果的分析 and 评价也常常缺乏必要的经验。《ANSYS 工程结构数值分析方法与计算实例》正是为了帮助广大技术人员学习和提升 ANSYS 应用水平而编写的参考书,本书结合大量计算实例,系统地介绍了 ANSYS 软件的理论知识和使用要点。

本册为第 1 分册,包含正文 11 章及 1 个附录,主要内容涉及 ANSYS 结构分析的预备知识、建模方法、结构分析、温度场分析及结构优化设计等方面。在预备知识部分,简要介绍了必备的理论背景、数值分析环境操作要点等内容;在结构分析及温度场分析部分,详细介绍了各类单元的使用及建模方法、载荷类型及边界条件的处理、结果的后处理与分析方法;在设计优化方面,重点介绍了基于 ANSYS Workbench 的参数优化方法。此外,本分册还介绍了装配体接触、子模型分析、热应力计算等系列专题内容。本分册的具体内容如下:

第 1 章是 ANSYS 工程结构数值分析预备知识,内容包括 ANSYS 有限元分析的理论基础、一般分析流程及两种数值分析环境的特点等。第 2 章介绍 Mechanical APDL 环境的使用要点,包括建模技术、加载与求解、后处理技术。第 3 章介绍 Workbench 环境的建模及分析技术,系统介绍了 Engineering Data、DM 及 Mechanical 三个组件的操作方法及要点。第 4 章为杆件结构分析,介绍了 ANSYS 的各种杆件单元的使用方法,结合例题介绍了杆件结构的建模和分析方法。第 5 章为二维弹性结构分析,介绍了常用的二维单元,结合例题介绍了平面对称问题及轴对称问题的处理方法。第 6 章为三维弹性结构分析,介绍了各种体单元的使用,结合例题系统介绍了一般三维结构分析的建模、加载及分析操作要点。第 7 章为板壳结构分析,介绍了壳单元、实体壳单元的用法及建模操作要点,结合例题介绍了板壳结构分析的建模、加载及后处理方法。第 8 章为装配体接触分

析,介绍了 ANSYS 处理接触问题及施加螺栓预紧力的方法,提供了典型分析例题。第9章为温度场分析及热应力计算,介绍了热传导分析及热应力的基本概念和方程,结合例题全面介绍了稳态、瞬态热分析及热应力分析的实现过程和方法。第10章介绍基于 ANSYS Workbench 的结构优化设计方法,结合典型例题全面介绍了 Workbench 的参数管理、DX 优化工具箱的使用等问题。第11章介绍 ANSYS 的子模型分析方法,通过典型例题介绍了基于 Workbench 的子模型分析过程,并与网格收敛性分析方法进行了对比。附录 A 介绍 APDL 语言的基础知识,包括标量及数组、循环与分支、数据库访问、宏及简单界面定制等内容。

本分册由石彬彬、张永刚等编著,尚晓江博士对本书内容提出了很有价值的指导意见,特在此表示感谢。此外,参与本书例题测试和文字录入工作的还有王睿、熊令芳、胡凡金、王文强、夏峰、李安庆、王海彦、刘永刚等,是大家的辛勤付出,才使得本书顺利编写完成。

由于本书编写时间较短,涉及内容较多,加之作者认识水平有限,不当之处在所难免,恳请读者批评指正。与本书相关的技术问题的咨询或讨论,可发邮件至邮箱:consult_str@126.com。

作者

2015年3月

目 录

第 1 章 ANSYS 工程结构数值分析预备知识	1
1.1 ANSYS 软件的理论基础简介	1
1.2 ANSYS 结构分析的一般流程	4
1.3 ANSYS 数值分析环境简介	9
第 2 章 Mechanical APDL 结构建模与分析技术	17
2.1 前处理技术	17
2.2 加载以及求解技术	25
2.3 后处理技术	28
第 3 章 Workbench 环境结构建模与分析技术	31
3.1 Engineering Data 界面	31
3.2 DM 几何建模技术	32
3.3 Mechanical 结构分析及其前后处理	41
第 4 章 杆件结构静力计算	70
4.1 杆件结构单元应用详解	70
4.2 桁架结构静力计算例题	73
4.3 梁单元静力计算例题	84
第 5 章 二维弹性结构的静力计算	126
5.1 二维弹性结构计算单元应用详解	126
5.2 平面弹性结构计算例题	129
5.3 轴对称弹性体计算例题:受内压的球形容器的	146
第 6 章 三维弹性体的静力计算	153
6.1 三维弹性体单元应用详解	153
6.2 三维弹性结构例题	156
第 7 章 板壳结构的静力计算	187
7.1 ANSYS 板壳单元应用详解	187
7.2 板壳结构静力计算例题:空腹梁的应力计算	190



7.3 板壳结构静力计算例题:Hydrostatic Pressure	201
第8章 装配体接触及螺栓预紧计算	211
8.1 装配体接触的建模与分析	211
8.2 装配体接触计算例题:螺栓预紧力	216
第9章 ANSYS 热传导与热应力计算	228
9.1 ANSYS 热传导分析的概念和方法	228
9.2 ANSYS 热应力计算的概念和方法	239
9.3 计算例题:电路板的热传导及热应力计算	241
第10章 ANSYS Workbench 参数优化技术	264
10.1 ANSYS Workbench 的参数与设计点管理	264
10.2 ANSYS Design Exploration 优化分析技术	267
10.3 参数优化例题	285
第11章 子模型技术	291
11.1 子模型技术简介	291
11.2 子模型计算例题	292
附录 A APDL 语言基础知识简介	320
A.1 标量参数与数组参数	320
A.2 循环与分支	322
A.3 访问 ANSYS 数据库	324
A.4 创建和使用 ANSYS 宏	327
A.5 简单的界面定制开发能力	327

第 1 章 ANSYS 工程结构数值分析预备知识

本章介绍 ANSYS 工程结构数值分析的有关基础知识。首先简单介绍有限元方法的基本思路和过程,随后介绍了相关算法理论,包括方程导出和计算过程。在此基础上继续介绍了基于 ANSYS 进行工程结构数值分析的一般流程,最后介绍了 ANSYS 的两种分析环境。

1.1 ANSYS 软件的理论基础简介

1.1.1 有限元方法的基本思路和过程

ANSYS 软件的理论基础是有限单元法,这种方法可视为杆件系统矩阵分析法(即用于杆件系统结构的有限单元法)的推广。基于此方法编制的 ANSYS 分析软件目前可处理各类结构力学、热传导、流场、声学、扩散以及有关的耦合场问题。

工程中的任何物理问题,其基本的控制方程都是连续域上的偏微分方程。要通过数学上的矩阵方法对其进行求解,首先需要把连续的求解域分割为有限数量的元素,这些元素被称为单元。相邻的单元之间仅通过有限个点联系起来,这些点被称为节点。在每个单元内通过节点值和近似函数对场变量进行插值,在各单元上应用变分方法或加权余量法建立离散的单元特性方程。单元特性方程的系数矩阵和常数项经组集后形成离散系统的控制方程(与时间无关的稳态问题为代数方程组,与时间相关的瞬态问题则为常微分方程组),此方程在引入边界条件后即可求得离散系统各节点处的场变量近似值。这就是有限单元法处理问题的基本思路。基于此数值方法,连续的无限自由度的问题经离散化之后,就变成为有限个自由度的问题,连续的偏微分控制方程变成为关于离散节点自由度的代数方程(或常微分方程)。

对于弹性结构分析而言,场变量为结构的位移。有限元方法处理弹性结构受力问题通常包括下面的几个基本步骤。

1. 结构离散化

结构首先被离散为有限数量的单元,单元之间仅通过节点相联系,于是力和变形也仅通过这些节点传递。结构所受到的各种分布载荷(体力和表面力),都按照静力等效的原则移置到节点上,成为节点力。

通过结构的离散化得到由若干单元在节点处连接并受节点荷载作用的结构体系。这一离散化的结构体系就是有限单元法分析的基本数学模型。

2. 元素分析(或单元分析)

对单元选择近似的位移函数,单元内各点位移用节点位移插值来近似。然后通过虚位移原理结合几何关系、物理关系得到单元平衡方程(又称单元刚度方程)。这一步称为单元分析。

3. 整体分析(或结构分析)

通过对各个节点建立受力分析,同时考虑节点外荷载以及包含此节点各单元对该节点

的作用力,得到一组以节点位移为基本未知量的总体平衡方程(又称为总体刚度方程)。这一步称为整体分析。

4. 引入约束条件计算位移解

引入支承条件,求解结构平衡方程,求解节点位移。

5. 计算其他量

最后,基于计算出的节点位移,结合几何关系及物理关系,计算应变、应力等其他关心的量。

以上就是弹性结构分析的有限元方法的基本思路与实施过程。

1.1.2 结构分析有限元方程的导出与求解

本节简单介绍结构分析的有限元方程的导出方法,在本节的相关推导中,不限定具体的结构或单元类型,而是介绍与各种结构和单元类型都相关的基本概念和方程,以帮助读者建立有限单元法最基本的概念体系。

当结构被离散化之后,首先对其每一个元素(即:单元)进行分析。

假设单元的位移向量(包含各位移分量)为 $\{u\}$,应变向量(包含各个应变分量)为 $\{\epsilon\}$,则单元应变与位移之间满足如下的几何关系:

$$\{\epsilon\} = [L]\{u\} \quad (1-1)$$

式中 $[L]$ ——对整体坐标的微分算子组成的矩阵。

如果单元的节点位移向量为 $\{u^e\}$,根据前述有限元方法的基本思路,单元内部位移通过节点位移及近似插值函数(形函数)表示,于是有:

$$\{u\} = [N]\{u^e\} \quad (1-2)$$

式中 $[N]$ ——形函数矩阵,其展开形式如下:

$$[N] = [N_1 [I]_{m \times m}, \dots, N_n [I]_{m \times m}] \quad (1-3)$$

式中 $[I]$ —— m 阶单位矩阵;

m ——各节点的位移自由度数,比如:平面应力单元的 m 为2,弹性力学空间单元的 m 为3;

n ——单元所包含的节点个数。形函数矩阵的非零元素为对应各节点的形函数。

式(1-2)代入式(1-1),得到:

$$\{\epsilon\} = [L][N]\{u^e\} = [B]\{u^e\} \quad (1-4)$$

式中 $[B]$ ——应变矩阵,表示节点位移和单元应变向量之间的关系。

如果单元的应力向量为 $\{\sigma\}$,则应力与应变之间满足如下的物理关系:

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon\} \quad (1-5)$$

式中 $[D]$ ——材料的弹性矩阵,即应力和应变关系矩阵。

根据结构分析的虚位移原理,在外力作用下处于平衡状态的弹性结构,当发生其约束条件允许的微小虚位移时,外力在虚位移上所作的功等于弹性体内的虚应变能。

如果 $\{F^e\}$ 表示节点载荷向量,则对于单元来说,其所受的外力就是 $\{F^e\}$ 。如果用 $\{u^{e*}\}$ 来表示单元的节点虚位移向量,用 $\{\epsilon^*\}$ 来表示相对应的虚应变向量,对任意一个单元应用虚位移原理,可以通过下式表示:

$$\iiint_V \{\epsilon^*\}^T \{\sigma\} dV = \{u^{e*}\}^T \{F^e\} \quad (1-6)$$

式中 $\{\sigma\}$ ——意义同前,为实际状态下的单元应力向量;

V ——所分析的单元的体积。

根据式(1-4),虚应变(虚位移所对应的应变)向量同样由应变矩阵来表示:

$$\{\epsilon^*\} = [B]\{u^e\} \quad (1-7)$$

式(1-7)及式(1-5)代入式(1-6),得到:

$$\{u^{e*}\}^T \iiint_V [B]^T [D] [B] dV \{u^e\} = \{u^{e*}\}^T \{F^e\} \quad (1-8)$$

两边消去节点虚位移,得到:

$$\iiint_V [B]^T [D] [B] dV \{u^e\} = \{F^e\} \quad (1-9)$$

如果令:

$$[k] = \iiint_V [B]^T [D] [B] dV \quad (1-10)$$

则式(1-9)可以改写为如下更简洁的形式:

$$[k]\{u^e\} = \{F^e\} \quad (1-11)$$

式(1-11)被称为单元刚度方程,该方程给出了单元节点载荷向量与单元节点位移向量之间的关系;其中, $[k]$ 称为单元刚度矩阵,其表达式已经由式(1-10)给出。

对于弹性力学问题的有限元分析而言,节点载荷向量 $\{F^e\}$ 包含由单元所受到的体积力等效载荷 $\{F_p\}$ 以及表面力的等效载荷 $\{F_q\}$ 。按照虚功等效原则,其表达式分别如下:

$$\{F_p\} = \iiint_V [N]^T \{p\} dV \quad (1-12)$$

$$\{F_q\} = \iint_S [N]^T \{q\} dS \quad (1-13)$$

式中 $\{p\}$ 和 $\{q\}$ ——分别表示体力以及表面力向量;

S ——表面力作用的单元表面区域。

至此,已经完成对弹性结构单元矩阵方程的形式推导。对于各种具体单元类型,有关的向量 $\{u\}$ 、 $\{\epsilon\}$ 、 $\{\sigma\}$ 以及 $\{u^e\}$ 、 $\{F^e\}$ 可包含不同的分量个数;相关的各个矩阵,如 $[L]$ 、 $[N]$ 、 $[B]$ 、 $[D]$ 、 $[k]$ 等可具有不同的维数,代入具体的量进行推导即可建立具体的单元刚度方程。在这里需要指出的是,在实际程序计算过程中,单元刚度矩阵和等效载荷的各元素实际上均采用了等参变换以及数值积分技术来计算。因此所采用的形函数均是在单元局部坐标系中,ANSYS理论手册中有各种单元类型形函数的详细描述。

下面继续进行结构的整体分析。

得到单元刚度方程后,进一步集合各单元的刚度方程,即可建立结构的整体平衡方程。在具体集成过程中,各单元刚度矩阵按照节点和自由度的编号在总体刚度矩阵对号入座,单元等效节点载荷也按照节点和自由度编号在结构总体载荷向量中对号入座。这种方法被称为直接刚度法,其原理是节点的平衡条件以及相邻单元在公共节点处的位移协调条件(即相邻单元在公共节点处的位移相等)。此过程即前面所述的结构分析过程。

结构分析中,单元刚度矩阵和单元等效载荷向量按照如下两式进行集成:

$$[K] = \sum_e [k] \quad (1-14)$$

$$\{F\} = \sum_e \{F_p\} + \sum_e \{F_q\} \quad (1-15)$$

以上两式中的求和符号表示各矩阵或向量元素放到总体矩阵或向量相应自由度位置的叠加,而不是简单的求和。通过单元刚度方程的集成,得到下面的总体刚度方程:

$$[K]\{U\} = \{F\} \quad (1-16)$$

式中 $[K]$ ——总体刚度矩阵;

$\{U\}$ ——结构的整体节点位移向量;

$\{F\}$ ——总体节点载荷向量,集成了各单元分布力的等效载荷,如果在某个节点上作用有集中载荷时,还需要在相应自由度方向上叠加集中载荷。

至此,已经建立了结构的总体平衡方程。由于单元刚度矩阵是奇异的,经过简单叠加集成的总体刚度矩阵也是奇异的,要求解此方程还需引入边界约束条件。通常采用的引入边界的做法是在指定位移节点所对应的刚度矩阵主对角元素乘以一个充分大的数,同时将右端载荷向量的相应元素改为指定节点位移值与同一个大数的乘积。这种处理方式使得 $[K]$ 中被修正的修正项远大于其他所有非修正项,客观上使得指定位移的节点满足了指定的位移边界条件。这种方式的好处是不仅可以处理零位移边界,也可以处理非零位移边界,且保持了总体刚度矩阵的稀疏和对称等基本特性。

引入了边界条件之后即可求解未知的节点位移,ANSYS 等软件中包含了各种常用的求解器,可根据计算模型的规模选择合适的方程求解器。得到位移解之后,即可按照上面的式(1-4)、式(1-5)根据求得的节点位移计算结构的支反力以及各单元的应变及应力。由于前述的刚度矩阵的计算实际上是采用数值积分的算法,因此计算的 $[B]$ 矩阵各元素以及应变和应力均是积分点处的值。在后处理过程中,计算程序会将这些积分点的计算结果经插值和平均化处理后输出节点处的值。

以上就是有限元方法处理弹性结构静力分析的基本方程导出及求解过程。

在动力分析中,还涉及到惯性力和阻尼力,与之相对应的单元和结构方程中通常均包含惯性项和阻尼项,对于一般载荷作用下的瞬态问题,结构分析方程实际上是一组二阶的常微分方程。相关的内容在第2分册的动力学有关章节中再作相应介绍,此处不再展开。

对于非线性分析,结构的刚度在分析过程中是变化的,其分析过程必然包含多次平衡迭代(一次迭代相当于一次线性分析),以能获得收敛解。常见非线性问题包括材料非线性、几何非线性以及接触分析。非线性分析的有关内容将在第2分册中加以介绍,此处不再详细展开。

1.2 ANSYS 结构分析的一般流程

本节介绍基于 ANSYS 的结构有限单元分析的一般流程,首先是分析方案的规划,介绍结构分析需要遵循的一系列指导性原则以及相关的注意事项。随后介绍前处理、加载求解以及后处理的三阶段标准分析流程;在各个阶段均涉及到一些相关的基本概念和术语,如:前处理阶段介绍了建立有限元模型的直接法和间接法,在求解阶段介绍了 ANSYS 的求解组织过程以及载荷步、子步等概念。

1.2.1 ANSYS 结构分析方案的规划

在正式开始建模之前,对结构分析的方案进行规划可以起到事半功倍的效果。结构分析

方案的规划通常包含如下三个方面的内容。

1. 确定分析问题的性质

在分析之前,需要弄清所分析问题对应的学科领域和物理模型,如:

(1)确定问题的学科领域

判断要分析的问题属于哪一个学科领域,如:结构力学、热传导、耦合场问题等。无论是何种类型的问题,都需要根据确定的问题性质进一步明确结构系统的特性,确定作用于所分析系统的激励情况和问题的边界条件。

(2)确定问题是否考虑时间因素

确定是否需要考虑时间因素。在结构分析中,如加载过程缓慢不至引起显著的动力响应时,采用结构静力分析即可;如果载荷的施加引起了显著的加速度响应,则必须采用动力分析。在温度场分析中,同样要弄清是稳态分析,还是瞬态的传热过程。

(3)确定是否包含非线性效应

在结构分析中,任何刚度的改变都会使得问题包含非线性。在温度场分析中,与温度相关的导热特性或表面换热系数,或模型中有辐射边界,都会引起非线性。如果分析中包含了非线性效应,则其分析过程会变得更加复杂。

2. 规划分析过程

对于复杂结构,其分析过程非常有必要进行事先的规划。

如果对三维结构的受力特点不清楚,可先进行二维或简化结构的快速分析,目的是弄清结构的传力机制和受力特点。在后续的三维结构计算中,即可进行更有针对性的建模和分析。

对于结构的动力计算,一般均需要先进行结构的模态分析,弄清结构的自然振动特性。在后续的结构分析中,一方面能够有助于确定积分时间步长,另一方面也可以帮助分析人员判断结构动力响应的正确与否。

对于结构的非线性计算,建议先进行线性的分析,以便检查模型中各部件的装配连接是否有误,还能预测可能的塑性变形位置,发现结构中的薄弱环节。在此基础上再进行非线性分析,可以显著提高分析的成功率。

对一般的线性分析,也需要结合计算硬件资源选择合适的求解器,对多个工况也需要进行规划,是采用逐个计算的方式,还是采用批量提交的方式等。

3. 规划建模方法

根据问题的性质和分析过程的总体规划,进行建模过程的规划,为建模进行准备。这里介绍一些建模方面的指导原则。

首先根据问题的性质选择适当的单元类型和单元形状和阶次。因为一般来讲,分析所选择的单元类型确定了结构的形式,如 PLANE 单元构成二维结构,SOLID 单元构成实体结构,SHELL 单元构成板壳结构,BEAM 单元构成梁及框架结构等。在单元的形状和阶次方面,对于一般弹性结构分析来说,高阶单元的精度高于低阶单元,六面体单元的计算效率高于四面体单元。在建模过程中,对于复杂的几何形状,如划分结构化的六面体单元有困难的情况下,采用高阶的四面体单元也能给出令人满意的解答。对于薄壁的实体结构,显然对几何模型进行中面抽取后用 SHELL 单元计算效率更高些。

无论何种分析,在建模过程中应充分利用结构的对称特点,采用对称性不仅可以降低计算规模,提高分析效率,而且也有助于提高分析的精度。可以利用的对称性包括轴对称、平面对

称、循环(或周期)对称。利用对称性,建模过程中只需要建立模型中的对称部分即可。轴对称仅需建立一个结构的对称剖面,平面对称结构仅需建立半个模型,循环对称则只需建立一个扇区模型。在这里需要强调指出的是,几何、材料特性及荷载分布全部满足对称条件才能利用结构的对称性,仅仅几何对称而其他条件不对称则并非对称性结构。

在模型的细节方面,如果是初步的分析,可以采用较为简化的模型,保留结构的整体受力特征即可,一些局部的细节通常无须考虑。对于详细的结构分析,需要根据所关注的问题特点确定是否保留模型的细节,比如一些安装螺栓的小孔在整体分析中可以忽略不计,但是如果还关注此孔周边的应力集中的情况,则必须在几何模型中保留这些细节并在其附近进行网格的细化。

不同的分析类型,也对模型创建的要求有所不同。比如,如果是模态分析或屈曲特征值分析,仅关注低阶特征值和模态,则模型可以采用较粗的网格,忽略一些不必要的几何细节特征;但是在模态分析中关注一些局部振动的高阶振型,则必须在这些关注的位置附近细化网格。由于在有限元分析中,应力的精度低于位移的精度,所以对于关注结构的应力分布的问题,如分析局部应力集中现象,必须采用较细致的网格划分,或者用一个较粗的整体网格进行初步分析,然后再采用子模型技术对局部的应力状态进行更细致的分析。

1.2.2 ANSYS 的基本分析流程

在对分析进行了必要的规划之后,即可正式开始结构的分析项目。本节介绍基于 ANSYS 的结构分析基本流程和相关的概念和注意事项。

通常,一个典型的结构分析流程包括前处理、加载以及求解、后处理三个环节。下面分别对各个环节及相关概念要点等进行介绍。

1. 前处理阶段

前处理阶段的任务是建立结构分析的有限元模型。根据所分析结构的特点,建立有限元模型可以采用两种完全不同的方法,即:直接法和间接法。

所谓直接法,就是直接创建节点和单元形成有限元模型。这种方法比较适合于杆件系统或形状简单规则、单元数比较少的板壳结构或弹性实体结构。在直接法的建模过程中,可以充分利用结构节点及单元的编号规律,从而实现快速的建模。通常是首先创建节点,然后通过节点创建单元。在创建单元之前,通常要指定单元的类型、单元的材料属性和截面特性等,以便向程序正确传递单元的信息。

尽管直接法理论上可以创建任意的模型,但是,如果采用直接法创建一般性的结构分析模型则效率十分低下,甚至几乎完全不具有实际可操作性。因此在 ANSYS 分析建模过程中使用更多的建模方法是下面要介绍的间接法。

所谓间接法,就是首先创建一个与实际结构形状一致或相近的几何模型(忽略了一些细节特征),然后再对此几何模型进行网格的剖分,形成离散化的有限元模型。网格剖分过程就是将分析的域划分为若干个单元的过程,这一过程在 ANSYS 中称为 Mesh。与直接法类似,间接法在 Mesh 之前,也需要给要划分网格的几何对象指定单元类型和单元属性。另一方面,还需要指定网格划分方法,并对划分的单元形状和尺寸进行必要控制,以便划分的网格能给出满意的解答。

无论采用何种建模方法,前处理阶段的输出成果都是相同的,即结构分析的有限元模型。

2. 加载以及求解阶段

在分析模型创建完成后,进入到加载和求解的阶段。

ANSYS 中的求解过程是通过载荷步及子步进行控制的。所谓一个载荷步,就是计算结构在给定边界条件和荷载作用下的一组解的过程。子步则是对载荷步的细分,对于线性分析载荷步不需要细分为子步。对于非线性问题,载荷是逐级施加的,采用增量加载,如果要施加的荷载总量作为一个载荷步来求解,则每一级加载就是一个子步,每个子步还可进行多次的平衡迭代。在结构动力学的谐响应分析和瞬态分析中,也需要指定子步,相关内容请参照本书的结构动力学部分。

为了得到正确的解答,需要按照规划好的载荷步逐个进行载荷步定义并求解,通常需要定义的载荷步信息包括载荷约束条件以及载荷步设置两方面。首先来看 ANSYS 程序支持的载荷形式,在 ANSYS 结构分析中,可以定义的载荷类型(包括约束)列于表 1-1 中。

表 1-1 ANSYS 结构分析常见载荷类型

载荷分类	载荷类型及施加对象	属于学科领域
自由度约束	固定支座、强迫位移、对称边界 可施加于点、线、面或节点(集)上	结构分析
集中力	集中力(力矩) 施加于梁以及板壳节点上	结构分析
线荷载	均布或变化分布的线荷载 施加于梁上	结构分析
表面力	压力,表面力 施加于面上或单元的表面上	结构分析
温度变化	恒定的温差作用 施加于节点(集)上	结构分析
体积力	重力加速度、角速度、角加速度 施加于体积上或单元(集)上	结构分析
自由度约束	给定温度边界 施加于线上、表面上或节点(集)上	热传导分析
热流率	给定热流率 施加于表面上、线上、节点(集)上	热传导分析
热流量	给定单位面积的热流率 施加于表面上	热传导分析
热生成	单位体积的热生成率 施加于体上或单元(集合)上	热传导分析
热对流	结构表面与环境的对流换热边界 施加于表面上	热传导分析
热辐射	结构表面通过辐射方式传热的边界 施加于表面上	热传导分析
耦合场载荷	一个场的自由度结果施加到另一个场的对应节点作为荷载	耦合分析

载荷步选项则包括指定载荷步结束的时间、载荷在载荷步时间内的变化方式、子步数、输出设置等,表 1-2 列出了 ANSYS 程序中常见的载荷步选项及其所起的作用。

表 1-2 ANSYS 常用载荷步控制选项

载荷步选项	作用
载荷步的结束时间	指定载荷步
子步数或时间步大小	指定载荷步的细化,可通过设置子步数或子步的时间来指定,有助于提高非线性计算或瞬态计算的精度
自动时间步	指定是否让程序根据计算情况自动在指定范围内选择子步数量
载荷步内的变化方式	表示载荷在载荷步内是线性递增还是阶跃式的变化方式
环境设置	指定结构工作环境参数,如环境温度
瞬态选项	指定瞬态分析的选项,如:是否打开时间积分效应、指定阻尼等,在动力学部分详细介绍
非线性选项	指定每个子步平衡迭代最多次数、收敛容差、终止分析条件等非线性分析选项
输出控制选项	指定输出文件的输出频率及其包含的结果项目等选项

关于 ANSYS 分析中的“时间”,这里作简单的阐述。在线性的静力或热稳态分析中,载荷步的结束时间实际上没有什么实质性意义,仅表征着加载的次序。在这种情况下,载荷步的作用在于分离不同的工况,通常可采用一个载荷步求解一种工况下的系统反应。在非线性的单步静力分析中,如果载荷步结束时间为 1,这种情况下的时间则反映了施加载荷总量的分数;也可将此种分析中的“时间”指定为所要施加的载荷总量,“时间”就代表施加的实际载荷。只有在瞬态分析中,时间才具有真实的意义。

实际加载时,表 1-1 所列的各种载荷除了施加在表中所列的施加位置外,均需要指定其数值或数值随时间的变化规律。对于载荷随“时间”变化的情况,实际上涉及到载荷历史的管理问题,后面两章会对此进行详细的介绍。

载荷步的定义(包括载荷以及载荷步的设置)完成后,即可进行求解。对单载荷步问题仅需一次求解;对于多个载荷步的问题,则可选择逐个求解多个载荷步,或通过写载荷步文件(但不求解)然后批量求解多个载荷步的方式进行求解。

3. 后处理阶段

计算完成后,最后的一个环节就是进行后处理。后处理的任务通常是查看和分析计算结果,验证解的正确性,形成分析结论或报告。

计算结束后,可通过后处理软件分析和查看各种基本结果和派生结果,基本结果通常是指节点解,如结构的节点位移解,而派生结果则通常是指单元解,如:单元的应力应变等。对于结构分析,可进行查看和分析的结果项目包括位移、支反力、应变、应力等;对于热传导分析,通常可查看的分析结果项目是温度分布、热通量及热梯度。对瞬态问题,还可查看时间历程变化的结果。

后处理阶段通常涉及到大量的图形、动画、表格、数据、曲线等操作。ANSYS 所提供的常用后处理功能及其作用列于表 1-3 中。

表 1-3 ANSYS 常见后处理功能

后处理功能	作用
变形形状显示	显示结构变形形状
等值线图形显示	显示各种标量结果的分布情况,如:总位移、应力、应变等的分布图形

续上表

后处理功能	作用
矢量图显示	显示各种矢量结果,可通过箭头的颜色或长短来表示矢量的模
路径图显示	显示变量沿指定路径的分布情况
切面图显示	显示变量在切面上的分布情况
动画显示	动画显示相关的结果,如:变形、模态等
工况组合	对不同的工况结果进行组合,可指定参与组合的系数
单元表	定义单元数据结果并用于后续分析
结果数据列表	列出或形成结果数据表格
曲线操作	形成各种时域、频域曲线
报告生成	形成分析报告

1.3 ANSYS 数值分析环境简介

在本节中,我们将简要介绍两种 ANSYS 数值分析环境的操作流程和界面特点。

1.3.1 ANSYS 结构分析软件的两操作环境

目前,ANSYS 结构分析软件同时提供了 Mechanical APDL 及 Workbench 中集成的 Mechanical 两套操作环境。Mechanical APDL 与 Mechanical 是两种风格迥异的操作环境,但它们背后的求解器都是 ANSYS Mechanical 结构力学求解器。

前已述及,一个典型计算分析流程包含前处理、求解以及后处理三个环节。在 Mechanical APDL 及 Mechanical 两种操作环境下,三个环节应用的 ANSYS 软件模块及操作方式的简要说明列于表 1-4 中。

表 1-4 操作环境比较

操作阶段		分析环境比较	
		Mechanical APDL	Mechanical
前处理	材料特性	在 Mechanical APDL 界面下指定材料属性	在 Engineering Data 界面下指定材料属性
	几何模型	方式 1: 在 Mechanical APDL 界面下直接建模。 方式 2: 利用几何接口导入 CAD 系统下创建的几何模型并在 Mechanical APDL 中作必要处理	方式 1: 基于 DM 或 SCDM 创建几何模型。 方式 2: 利用几何接口导入 CAD 系统下创建的模型。 方式 3: 导入 CAD 系统几何再通过 DM 或 SCDM 作必要的处理
	网格划分	在 Mechanical APDL 界面下进行网格划分	在 Mechanical 界面下进行网格划分
求解	加载分析设置	在 Mechanical APDL 界面下进行载荷步设置、加载及其他求解选项的设置	在 Mechanical 界面下进行载荷步设置、加载及其他求解选项的设置
	计算	调用统一的 ANSYS 结构分析求解器进行计算	
后处理	后处理	在 Mechanical APDL 界面下进行结果的查看及分析	在 Mechanical 界面下进行结果的查看及分析

通过上表可看出,无论是采用 Mechanical APDL 还是 Mechanical 进行结构数值计算,都是基于统一的 ANSYS 结构分析求解器来完成的。因此操作过程中需要提供的信息(如:模型数据、载荷、求解设置选项等)和输出的计算结果项目都是相同的,只是操作的界面和方法不同而已。用户可以根据问题特点选择适宜的操作界面, Mechanical APDL 适合于杆系结构建模分析, Mechanical 则在处理实体部件装配接触等方面效率更高。在下面的两个小节中,将介绍 ANSYS 结构分析两种分析环境的界面及操作方法特点。第 2 章以及第 3 章将详细介绍两种环境下的前处理、加载求解及后处理方法。

1.3.2 认识 Mechanical APDL 环境

ANSYS Mechanical APDL 环境又称为 ANSYS 经典分析环境,该环境下可以完成结构数值分析的建模、加载、求解、后处理以及结构优化设计等工作,其操作界面如图 1-1 所示,此操作界面由左侧的 Main Menu(主菜单)、上部的 Utility Menu(功能菜单)、Utility Menu 下方的 Toolbar(工具栏)以及 Input Window(操作命令输入栏)、中间的 Graphic Window(图形显示窗口)、下方的操作提示栏(Prompt line)及系统状态栏(Status bar)所组成。此外,还有一个独立于界面的输出信息的窗口(Output Window)。如果用户希望在一个文件中查看输出信息,而不是打印到屏幕输出窗口,可通过菜单项 Utility Menu>File>Switch Output to>file...来指定要写入信息的输出文件。

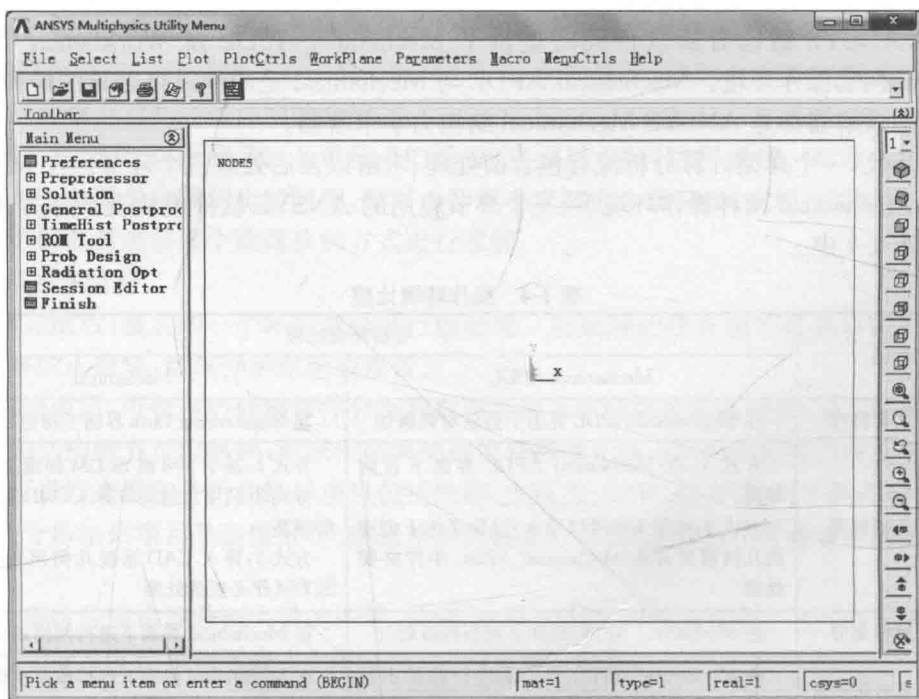


图 1-1 Mechanical APDL 环境的 GUI

Mechanical APDL 界面各部分的分区情况及其功能列于表 1-5 中。