

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2分册：结构动力学问题、结构非线性问题

◎熊令芳 石彬彬 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2分册:

结构动力学问题、结构非线性问题

熊令芳 石彬彬 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 2 分册,共包含 11 章、2 个附录,主要内容包括基于 ANSYS 的工程结构动力计算、非线性计算两大部分。动力计算部分,结合例题系统介绍 ANSYS 的各种动力分析方法(自振特性、简谐载荷响应、瞬态分析、响应谱、随机振动、多体动力学、显式动力学);在非线性分析部分,介绍了各类常见非线性问题(材料非线性、几何非线性与屈曲、接触)的处理方法和注意问题,均结合例题讲解。

本书适合工科相关专业的研究生及高年级本科生作为学习有限元分析及 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 2 分册,
结构动力学问题、结构非线性问题/熊令芳等编著. —北京:
中国铁道出版社,2015. 10

(ANSYS 仿真分析系列丛书)

ISBN 978-7-113-20931-5

I. ①A… II. ①熊… 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 212767 号

ANSYS 仿真分析系列丛书

书 名: ANSYS 工程结构数值分析方法与计算实例
第 2 分册:结构动力学问题、结构非线性问题

作 者:熊令芳 石彬彬 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. 25 字数:536 千

书 号:ISBN 978-7-113-20931-5

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 2 分册,包含正文 11 章及 2 个附录,主要内容涉及 ANSYS 工程结构动力计算及非线性计算两大部分。在结构动力计算部分,简要介绍了 ANSYS 动力分析的理论基础,系统介绍了 ANSYS 的各种动力分析方法的实现过程,包括自振特性分析、简谐载荷响应分析、瞬态分析、响应谱分析、随机振动分析、多体动力学分析、显式动力学分析等。在非线性分析部分,简单介绍了各类常见的非线性问题类型(材料非线性、几何非线性与屈曲、接触),详细讲解了 ANSYS 对常见的非线性问题的处理方法。

本分册的相关章节都是结合典型算例进行讲解,包含建模、计算以及计算结果的分析 and 探讨等内容,涉及到 Mechanical APDL 和 Workbench 两种分析环境,有些例题采用了两种分析环境下的对比分析。本分册的具体内容如下:

第 1 章是 ANSYS 结构动力学分析概述,简要介绍了 ANSYS 的动力分析功能、应用领域及相关的概念和理论背景。第 2 章介绍 ANSYS 结构振动模态计算,分别介绍了在 Mechanical APDL 以及 Workbench 两种不同分析界面下进行模态分析及预应力模态分析的实现过程,通过算例讨论了计算结果和有关概念。第 3 章为 ANSYS 谐响应计算,介绍了在 Mechanical APDL 以及 Workbench 两种分析界面下进行完全法和模态叠加法谐响应分析的实现过程,通过例题详细介绍和讨论了相关的计算方法和概念。第 4 章为 ANSYS 瞬态动力计算,同样介绍了两种分析环境下的完全法及模态叠加法瞬态计算的实现过程,通过例题比较

了不同加载条件下的结构瞬态响应特点。第 5 章为 ANSYS 响应谱计算,主要介绍基于地震响应谱的计算方法,并提供了典型算例。第 6 章为 ANSYS 随机振动计算,介绍了 PSD 分析实现过程,通过算例介绍了相关的操作方法和概念。第 7 章为 ANSYS 机构运动及多体动力学分析,介绍了在 Workbench 环境下的刚体动力分析及刚柔混合体分析方法,提供了典型例题。第 8 章为非线性基本概念及材料非线性分析,介绍了相关的基本概念、算法原理及弹塑性分析的实现过程,提供了一个典型的弹塑性结构分析例题。第 9 章为几何非线性分析及屈曲分析,简要介绍了几何非线性问题的几种类型和分析选项,详细介绍了屈曲问题(一类典型的几何非线性问题)的分析方法,还提供了结构大变形分析、特征值屈曲及非线性屈曲的典型例题。第 10 章为 ANSYS 接触非线性分析,详细介绍了在 Mechanical APDL 及 Workbench 中接触关系的建立方法,提供了齿轮啮合分析的典型接触例题。第 11 章为 ANSYS 显式动力学分析方法与例题,结合子弹击穿钢板的例题介绍了 Workbench 环境中基于 ANSYS 显式动力学求解器进行非线性瞬态分析的实现过程。附录 A 介绍了各种动力学分析中常见的抽象单元的特点和使用方法,对部分单元提供了实际算例。附录 B 介绍了在 Workbench 环境中通过 System Coupling 组件进行流固耦合动力分析的实现过程。

本书由熊令芳、石彬彬等编著,尚晓江博士对本书内容提供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编写工作的还有胡凡金、王文强、夏峰、李安庆、张永刚、王睿、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。此外,还要感谢中国铁道出版社的编辑老师为本书的出版而付出的劳动。

由于本书编写时间较短,涉及内容较多,加之作者认识水平的局限,书中的不当甚至错误之处在所难免,恳请读者批评指正。与本书相关的技术问题咨询或讨论,可发邮件至此邮箱:consult_str@126.com。

作者

2015 年 3 月

目 录

第 1 章 ANSYS 结构动力学分析概述	1
1.1 ANSYS 结构动力分析功能及应用简介	1
1.2 ANSYS 动力分析的基本概念和原理	2
第 2 章 ANSYS 结构振动模态计算	5
2.1 Mechanical APDL 中的模态分析方法	5
2.2 Workbench 中的模态分析方法	19
2.3 模态分析例题	36
第 3 章 ANSYS 谐响应计算	54
3.1 Mechanical APDL 中的谐响应分析实现过程	54
3.2 Workbench 中的谐响应分析实现过程	75
3.3 谐响应分析例题	81
第 4 章 ANSYS 瞬态动力计算	105
4.1 Mechanical APDL 中的瞬态分析实现过程	105
4.2 Workbench 中的瞬态分析实现过程	120
4.3 Workbench 瞬态分析例题:钢结构平台	126
第 5 章 ANSYS 响应谱计算	146
5.1 Mechanical APDL 响应谱分析实现过程	146
5.2 Workbench 响应谱分析实现过程	151
5.3 响应谱分析例题:钢结构平台响应谱计算	157
第 6 章 ANSYS 随机振动计算	165
6.1 Mechanical APDL 随机振动分析的实现过程	165
6.2 Workbench 随机振动分析的实现过程	171
6.3 随机振动分析例题:钢结构平台 PSD 计算	178
第 7 章 ANSYS 机构运动及多体动力学分析	186
7.1 ANSYS 多体动力学分析的实现方法	186
7.2 刚体动力学计算例题:曲柄滑块机构运动仿真	189

第 8 章 非线性基本概念及材料非线性分析	208
8.1 非线性问题的分类和基本算法	208
8.2 ANSYS 弹塑性分析的材料定义	210
8.3 静不定桁架的弹塑性分析例题	218
第 9 章 几何非线性分析与屈曲分析	224
9.1 ANSYS 几何非线性的基本概念与分析要点	224
9.2 屈曲分析的概念和方法	225
9.3 几何非线性及屈曲分析例题	236
第 10 章 ANSYS 接触非线性分析	268
10.1 ANSYS 中的接触分析方法	268
10.2 接触分析例题:齿轮接触分析	272
第 11 章 ANSYS 显式动力分析方法与例题	283
11.1 ANSYS 显式分析方法简介	283
11.2 子弹击穿钢板显式动力学分析.....	284
附录 A 结构动力学分析常用的几个单元	298
A.1 COMBIN14	298
A.2 MASS21	303
A.3 MATRIX27	308
A.4 COMBIN39	314
A.5 COMBIN40	320
附录 B System Coupling 及流固耦合技术简介	329

第 1 章 ANSYS 结构动力学分析概述

ANSYS Mechanical 具备全面的结构动力学分析功能,基于 ANSYS Mechanical 可分析各种常见的工程结构动力特性及行为。本章的第 1 节是 ANSYS 结构动力分析功能和应用介绍,介绍了各种 ANSYS 结构动力学分析类型及其可以分析的工程问题类型。本章的第 2 节是 ANSYS 动力分析的基本概念和原理,由结构动力学的基本方程出发,介绍了各种 ANSYS 动力分析类型的相关理论背景,这些是基于 ANSYS 进行结构动力分析所必须具备的理论基础。

1.1 ANSYS 结构动力分析功能及应用简介

ANSYS 结构动力学分析的主要功能包括模态分析、谐响应分析、瞬态分析、响应谱分析、随机振动分析以及多体动力学分析等,这一系列动力分析类型构成了一个比较完整的结构动力分析的工具体系。

ANSYS 模态分析用于计算动力系统的固有振动特性:频率及振形。首先,模态分析可用于判断结构是否有动力效应,通过模态分析的结果,可以了解到结构的固有频率和外部激励频率的关系,进而判断是否需要进行动力分析,通常激励频率低于激励方向结构固有振动频率的 $1/3$ 可不进行动力学分析,简化为静力的结构分析问题。模态分析中,一类有代表性的问题是包含应力刚度的结构模态分析。张紧的琴弦具有特定的侧向振动频率,而松弛状态的弦则不具有这种特性,这是由于沿着琴弦方向的拉应力对侧向刚度的贡献。旋转的叶片具有更高的自振频率,也同样是应力刚化的结果。在 ANSYS 的动力学分析体系中,模态分析还是其他一些其他动力分析类型的基础,比如:基于模态叠加的谐响应分析、模态叠加法瞬态分析、谱分析等,都需要基于模态的结果。

ANSYS 谐响应分析用于计算结构在简谐荷载作用下的动力学响应。在各种类型的动力荷载中,简谐荷载是最简单也是最常见的一种动力学激励。由结构受迫振动的稳态解答可知,结构在简谐荷载作用下的响应与施加的荷载之间存在一个相位差。ANSYS 谐响应分析可分析结构在一个频率范围的简谐激励作用下,结构的稳态响应幅值和相位与激励频率之间的关系。谐响应分析的激励必须是同频率的,但可以有相位差。ANSYS 谐响应分析可以基于模态叠加的方法,也可以直接解算结构动力方程组,谐响应分析假定结构的行为是线性的,不能考虑任何非线性因素。谐响应分析的结果可以帮助设计人员了解结构的持续动力特性,验证是否能够避免共振、疲劳以及其他受迫振动引起的有害效应。谐响应分析在各类旋转机械(如:水泵、风机等)的支座、固定装置设计中较为常用。

ANSYS 瞬态分析用于计算结构在随时间任意变化的动力荷载作用下的时间历程动力响应。ANSYS 的瞬态分析提供了两种类型的解法,即:模态叠加法和时域积分法。模态叠加法

基于线性叠加原理,因此不能考虑非线性因素;而时域积分方法则可以考虑所有的非线性因素。时域积分法又包括 Newmark 方法、HHT 方法以及显式的中心差分法(用于显式动力分析程序 ANSYS LS-DYNA 或 ANSYS Explicit STR 中)。瞬态分析的典型应用包括各种工程结构在 seismic 波作用下的振动时间历程分析、结构受到冲击作用的动力响应计算、结构受到流体影响引发的耦合振动分析等。瞬态分析可以得到详尽的结构动力过程和行为,其计算所用的时间和计算资源通常较多,计算结果文件的规模一般也比较大。

ANSYS 响应谱分析是结构瞬态分析的一种简化,是一种基于模态叠加的拟静力方法。响应谱分析能够考虑结构各频段振动的振幅最大值和振型参与因素,能够得到结构的最大动力响应,但是此方法不能考虑任意的非线性因素且不能考虑相位和时间因素。ANSYS 提供单点响应谱和多点响应谱分析方法。单点谱分析是在单一点集上定义一条(或一组)响应谱,多点谱分析则是在模型的多个点集合上定义不同的响应谱。在模态合并方法方面,提供了 SRSS、CQC 等常用方法。响应谱分析在各种建筑物(构筑物)、桥梁结构、核电站建筑或装置的抗震分析领域应用广泛,已经成为结构设计的标准化计算方法。

ANSYS 随机振动分析用于计算结构对随机荷载反应的统计规律。此分析在结构上施加功率谱密度(PSD),计算结构响应的 PSD 曲线及响应参数的 1sigma 值。随机振动分析的结果有助于工程师了解结构响应随频率变化的规律。常用于各种航天结构的动力分析中。

ANSYS 多体动力学分析用于计算多体系统的动力学行为。在多体系统分析中,通常包括刚体、柔性体以及运动副(Joint)。目前支持的运动副包括 Revolute、Universal、Slot、Translational、Cylindrical、Spherical、Planar 等。

本书的第 2 章至第 7 章将详细介绍上述各种动力学分析的实现方法。

1.2 ANSYS 动力分析的基本概念和原理

在结构动力学分析中,必须考虑结构的惯性力向量及阻尼力向量,于是 ANSYS 结构动力分析的基本方程为:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (1-1)$$

式中 $\{\ddot{u}\}$ 、 $\{\dot{u}\}$ 、 $\{u\}$ ——依次为节点加速度向量、节点速度向量、节点位移向量;

$[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ ——依次为总体质量矩阵、总体阻尼矩阵、总体刚度矩阵;

$\{F(t)\}$ ——节点荷载向量。

上述结构动力方程中的总体质量矩阵、总体阻尼矩阵与静力分析中的总体刚度矩阵的处理方式相似,也是由单元矩阵组合装配形成。结构中任一单元的单元质量矩阵 $[M^e]$ 和单元阻尼矩阵 $[C^e]$ 的一般表达式如下:

$$[M^e] = \int_{V_e} \rho [N]^T [N] dV$$

$$[C^e] = \int_{V_e} c [N]^T [N] dV$$

上述形式的单元矩阵通常又被称为一致单元质量矩阵和单元阻尼矩阵。

对于模态分析,仅考虑结构自身的特性,与外部作用无关,通常也不考虑阻尼,此时结构的动力方程简化为:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = 0 \quad (1-2)$$

如果令 $\{u\} = \{\phi_i\} \cos(\omega_i t)$, 代入结构自由振动有限元方程, 简化得到:

$$([K] - \omega_i^2 [M]) \{\phi_i\} = 0 \quad (1-3)$$

上式为一个齐次线性方程组, 其有非零解的条件为:

$$\det([K] - \omega_i^2 [M]) = 0 \quad (1-4)$$

式(1-4)是结构频率特征值分析的基本方程, 通过求解这一特征值问题可得到结构的各阶自振频率和振型。对振型计算结果, ANSYS 程序还提供了两种归一化方法。一种方法是振型向量最大分量归一, 其他各分量按比例缩放; 另一种是关于质量矩阵归一化, 即满足:

$$\{\phi_i\}^T [M] \{\phi_i\} = 1 \quad (1-5)$$

对于考虑应力刚化效应的模态分析, 只需在以上频率特征值方程的刚度矩阵中增加应力刚度项即可, 依然为特征值问题。

作为结构动力分析中一类常见的特殊问题, 当结构外荷载为简谐荷载时, ANSYS 提供了谐响应分析来给出系统在简谐荷载作用下的最大稳态响应。假设外荷载的频率为 Ω , 外荷载和稳态位移响应的相位分别为 ψ 及 φ , 简谐外荷载及稳态位移响应分别为:

$$\{F(t)\} = \{F_{\max} e^{i\psi}\} e^{i\Omega t} = \{F_{\max} \cos\psi + iF_{\max} \sin\psi\} e^{i\Omega t} = \{F_1 + iF_2\} e^{i\Omega t} \quad (1-6)$$

$$\{u(t)\} = \{u_{\max} e^{i\varphi}\} e^{i\Omega t} = \{u_{\max} \cos\varphi + iu_{\max} \sin\varphi\} e^{i\Omega t} = \{u_1 + iu_2\} e^{i\Omega t} \quad (1-7)$$

将式(1-6)、式(1-7)代入结构动力有限元方程, 可得:

$$(-\Omega^2 [M] + i\Omega [C] + [K]) \{u_1 + iu_2\} = \{F_1 + iF_2\} \quad (1-8)$$

求解此方程组即可求出给定加载频率 Ω 的稳态位移响应幅值和相位角。

在瞬态分析中, 结构动力学方程是一个二阶的常微分方程组, 需引入初始条件(初位移、初速度)及边界条件才能求解。ANSYS Mechanical 中提供了振型叠加法、缩减法以及完全法三种求解方法。目前使用最多的方法是完全法。

下面以 Newmark 完全法瞬态分析为例, 介绍瞬态分析的计算实现过程。

在 $t + \Delta t$ 时刻结构满足如下形式的动力学方程:

$$[M] \{u_{t+\Delta t}\} + [C] \{\dot{u}_{t+\Delta t}\} + [K] \{u_{t+\Delta t}\} = \{F_{t+\Delta t}\} \quad (1-9)$$

Newmark 方法假设 $t + \Delta t$ 时刻的节点速度向量、节点位移向量通过 t 时刻的节点速度向量、节点加速度向量以及节点位移向量按如下两个等式表示:

$$\{\dot{u}_{t+\Delta t}\} = \{\dot{u}_t\} + [(1-\beta)\{\dot{u}_t\} + \beta g \{\dot{u}_{t+\Delta t}\}] \Delta t \quad (1-10)$$

$$\{u_{t+\Delta t}\} = \{u_t\} + \{\dot{u}_t\} \Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha \right) \{\dot{u}_t\} + \alpha g \{\dot{u}_{t+\Delta t}\} \right] \Delta t^2 \quad (1-11)$$

后面一个等式可改写为:

$$u_{t+\Delta t} = \frac{1}{\alpha \Delta t^2} (u_{t+\Delta t} - u_t) - \frac{1}{\alpha \Delta t} \dot{u}_t - \left(\frac{1}{2\alpha} - 1 \right) u_t \quad (1-12)$$

此式与前面的第一个等式代入 $t + \Delta t$ 时刻结构动力学方程, 得到:

$$\begin{aligned} [\hat{K}] \{u_{t+\Delta t}\} &= \left(\frac{[M]}{\alpha \Delta t^2} + \frac{\beta [C]}{\alpha \Delta t} + [K] \right) \{u_{t+\Delta t}\} \\ &= [M] \left[\frac{1}{\alpha \Delta t^2} \{u_t\} + \frac{1}{\alpha \Delta t} \{\dot{u}_t\} + \left(\frac{1}{2\alpha} - 1 \right) \{\dot{u}_t\} \right] + \\ &\quad [C] \left[\frac{\beta}{\alpha \Delta t} \{u_t\} - \left(1 - \frac{\beta}{\alpha} \right) \{\dot{u}_t\} - \left(1 - \frac{\beta}{2\alpha} \right) \{\dot{u}_t\} \right] + \{F_{t+\Delta t}\} \end{aligned} \quad (1-13)$$

通过上式对 $[\hat{K}]$ 求逆阵, 得到 $t + \Delta t$ 时刻的节点位移向量 $\{u_{t+\Delta t}\}$, 然后回代到前面的两个

等式,即可得到 $t+\Delta t$ 时刻的节点速度向量 $\{\dot{u}_{i+\Delta t}\}$ 以及节点加速度向量 $\{u_{i+\Delta t}\}$ 。

在非线性瞬态分析中,因 $[K]$ 中包含 $[K]$,因此必须进行多次平衡迭代(后面非线性一章介绍)才能达到平衡。

除了 Newmark 方法外,时间积分的算法还是 HHT 方法及中心差分法,这些方法的瞬态动力学分析过程,可参考 ANSYS Mechanical 以及 LS-DYNA 的理论手册,这里不再详细叙述。

关于谱分析,目前工程中较为常用的是单点响应谱方法,此方法也是结构地震反应计算中的常规性方法。响应谱分析是基于模态叠加的思想,由结构各阶模态的动力响应按照一定方式组合得到结构的谱响应。

在响应谱分析中,结构的第 i 阶模态的响应 R_i 由模态向量乘以模态系数得到,即:

$$R_i = A_i \{\Psi_i\} \quad (1-14)$$

式中 $\{\Psi_i\}$ ——结构的第 i 阶振形;

A_i ——第 i 阶模态的模态系数。

对于加速度反应谱,结构的第 i 阶模态系数则由下式给出:

$$A_i = \frac{S_{ai}\gamma_i}{\omega_i^2} \quad (1-15)$$

式中 γ_i ——第 i 阶模态的模态参与系数;

S_{ai} ——对应于第 i 阶频率的加速度响应谱值;

ω_i ——结构的第 i 阶自振圆频率。

常用的模态合并方法有 SRSS、CQC。对于 SRSS 模态组合方法,结构的总响应 R_a 由下式给出:

$$R_a = \sqrt{\sum_{i=1}^N (R_i)^2} \quad (1-16)$$

对于 CQC 模态组合方法,结构的总响应 R_a 由下式给出:

$$R_a = \sqrt{\left| \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N k_{\epsilon_{ij}} R_i R_j \right|} \quad (1-17)$$

其中的组合参数如下:

$$k = \begin{cases} 1 & i=j \\ 2 & i \neq j \end{cases}$$

$$\epsilon_{ij} = \frac{8 \sqrt{\zeta_i \zeta_j} (\zeta_i + r \zeta_j) r^{3/2}}{(1-r^2)^2 + 4 \zeta_i \zeta_j r (1+r^2) + 4 (\zeta_i^2 + \zeta_j^2) r^2}$$

$$r = \omega_j / \omega_i$$

式中 ζ_i 、 ζ_j ——分别为第 i 阶和第 j 阶模态的阻尼比;

r —— j 阶和 i 阶圆频率之比。

第2章 ANSYS 结构振动模态计算

本章介绍在 ANSYS 中进行模态分析的具体实现过程,第1节介绍在 Mechanical APDL 中的模态分析,第2节介绍在 Workbench 中的模态分析方法,第3节为模态分析的计算例题。在介绍模态分析方法时,包含了普通模态分析和预应力模态分析。

2.1 Mechanical APDL 中的模态分析方法

本节介绍在 ANSYS Mechanical APDL 环境中模态分析的实现过程和操作要点。

2.1.1 普通模态分析

在 Mechanical APDL 中,普通模态分析与其他分析类似,同样包括前处理、求解以及后处理三个环节,各环节中又包含有若干个具体的操作步骤,下面介绍模态分析的关键环节和步骤的操作方法和注意事项。

1. 前处理

前处理环节的主要工作内容是创建模态分析的结构有限元计算模型。在 Mechanical APDL 中,建模是通过前处理器 PREP7 完成的,包括下列具体的操作步骤:

(1) 创建或导入几何模型

通过/PREP7 命令进入前处理器,然后通过其实体建模功能创建几何模型,也可直接导入外部建好的 CAD 模型。

(2) 定义单元属性

单元属性通常包括单元类型、单元截面(实常数)、材料模型。

模态分析支持广泛的单元类型,包括各种实体单元(二维、三维)、板壳单元、梁单元、质量单元、弹簧单元等等。对于壳单元、梁单元,需要为其指定截面信息,梁单元通常还需要指定横截面的定位关键点。对弹簧、质量等单元需要指定弹性系数、质量以及转动惯量等实常数。材料模型方面,由于模态分析的线性本质,只能支持线性材料模型(其中也包括正交异性材料),如果采用的不是集中质量模型还需要指定结构材料的密度参数。

(3) 划分网格形成有限元模型

在 Mechanical APDL 中,划分网格通常分为三步。首先为待划分的几何对象指定各种单元属性,然后再指定待网格划分几何对象的单元形状和网格尺寸,最后是划分网格形成有限元分析模型。

在网格的密度方面,对于仅需要低阶整体振形的问题,较粗略的网格划分即可满足精度;而对高阶局部振形则需要较细致的网格。

在创建模态分析的有限元模型时,也可以直接创建节点并通过节点创建单元,尤其是在创建

弹簧、质量单元组成的离散系统时。

建模结束后,选择主菜单的 FINISH 按钮,退出前处理器 PREP7。

2. 进行模态求解

模态求解阶段的工作内容包括选择分析类型、施加约束条件、设置分析选项、模态求解以及模态扩展等。

(1) 选择分析类型

首先打开求解器,选择菜单 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis,弹出 New Analysis 选择框,在其中[ANTYPE] Type of analysis 中选择分析类型为 Modal,如图 2-1 所示。对应命令为 ANTYPE,MODAL。

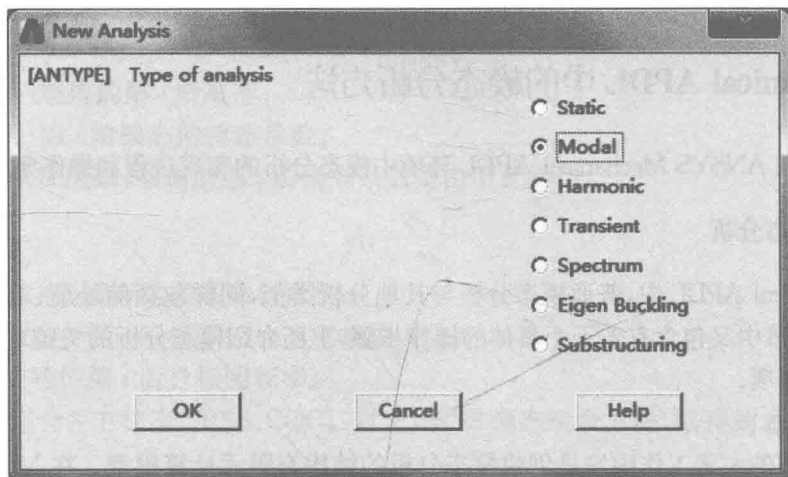


图 2-1 选择模态分析类型

(2) 施加约束条件

根据结构的受力,施加支座约束条件。在 ANSYS 模态分析中,只允许施加零位移约束,不允许施加非零的强迫位移,如果施加了非零位移约束则程序会代之以零位移约束。

约束条件对模态分析结果起着决定性的作用。一方面,如果不施加任何约束可以得到自由模态。对 3D 结构而言,不施加任何约束得到前 6 阶模态的频率为零,即刚体位移模态。另一方面,对于施加了约束结构的模态分析,其结果的正确与否与所施加约束是否反映了结构的实际约束状态密切相关。对于模态分析取半边结构分析而施加的对称性约束,在使用中也要特别注意,这类约束可能会过滤掉一些模态。比如说,在结构的镜面对称面上施加了反对称的约束,则无法获得对称变形的模态。

(3) 设置分析选项

通过选择菜单 Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options,打开 Modal Analysis 设置框。对于普通模态分析,此设置框中需要设置的选项包括模态提取方法及提取数量、模态扩展设置选项、质量矩阵选项等。

下面介绍具体的选项。

1) 模态提取方法

如图 2-2 所示,在 Modal Analysis 设置框中,Mode extraction method 选项用于选择模态提取

方法,ANSYS 提供的模态分析方法见表 2-1。

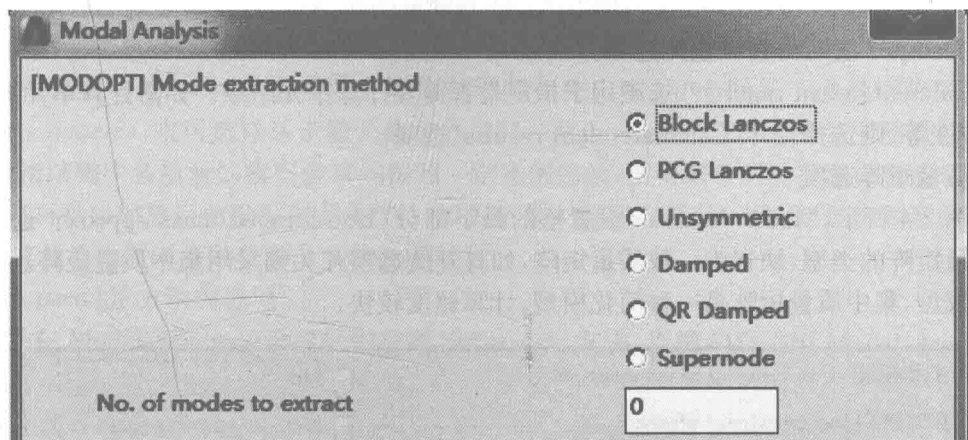


图 2-2 Modal Analysis 设置

表 2-1 ANSYS 模态提取方法

模态提取方法	说 明
Block Lanczos	分块 Lanczos 方法,是程序中的缺省计算方法,适合于分析壳单元或网格质量较差的实体单元结构
PCG Lanczos	PCG Lanczos 方法,是一种与 PCG 迭代技术结合的 Lanczos 方法,适用于处理 3D 体单元组成的大规模计算模型(大于 50 万 DOF),提取的模态数不宜过多,建议在 100 阶以内
Supernode	超节点方法,适合于分析大型结构提取大量模态数的情况。当提取的模态数超过 100~200 阶时,此方法的效率比 Block Lanczos 或 PCG Lanczos 高。此方法采用一致质量矩阵,不允许采用集中质量矩阵
Unsymmetric	非对称方法,适用于分析刚度阵或质量阵不对称的模态问题。计算中采用 Lanczos 算法
Damped	阻尼方法,用于分析有阻尼体系的模态。计算中采用 Lanczos 算法,计算得到复数特征值和特征向量,特征值的虚部代表频率,实部代表稳定性
QR Damped	QR 阻尼方法,此方法能很好地分析分析小阻尼问题,适合于分析大型的模型

对普通的模态分析,使用较多的方法是 Block Lanczos 方法、PCG Lanczos 方法以及 Supernode 方法。

2) 模态提取数量

如图 2-2 所示,在 Modal Analysis 设置框中,No. of modes to extract 选项用于指定模态提取的阶数。

3) 模态扩展选项设置

如图 2-3 所示,在 Modal Analysis 设置框中,通过 MXPAND 命令设置模态扩展选项。

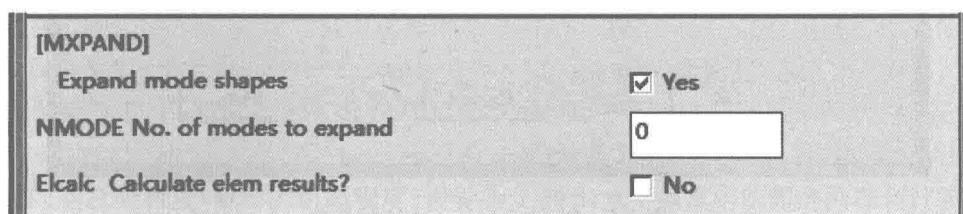


图 2-3 Modal Analysis 设置

①Expand mode shapes 选项用于指定是否扩展模态振形,缺省为 Yes。

②No. of modes to expand 选项用于指定需要扩展的模态阶数,仅当采用 Unsymmetric 方法以及 Damped 法时需要设置此选项。

③Calculate elem results? 选项用于指定是否需要计算单元结果。如需计算单元结果,如应力、应变等,则选择打开“Calculate elem results”选项。

4) 质量矩阵选项

如图 2-4 所示,Modal Analysis 设置框的最下部分,Use lumped mass approx? 选项用于指定质量矩阵的类型,缺省为一致质量矩阵,如打开此选项开关则采用集中质量矩阵。对于分布质量模型,集中质量矩阵是一种简化模型,计算速度较快。

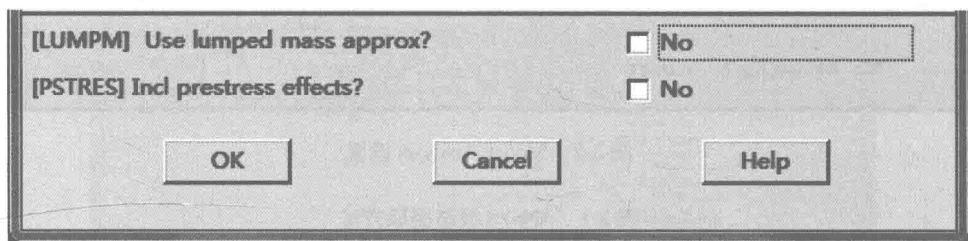


图 2-4 Modal Analysis 设置

5) 预应力刚度选项

Include prestress effects? 选项用于指定是否在分析中考虑预应力刚度效应,缺省为关闭,即在分析中不考虑预应力引起的刚化行为。如打开此选项,则在分析中考虑预应力刚化效应的模态分析,相关内容在 2.1.2 节中介绍。

6) 模态提取方法的选项

选定了模态提取方法后,需要对所选择的模态提取方法进行进一步的选项设置。

①Block Lanczos 方法的选项

如果在 Modal Analysis 设置框中选择缺省的 Block Lanczos 方法,当按 OK 关闭 Modal Analysis 设置框后,会接着打开 Block Lanczos Method 设置框,如图 2-5 所示。

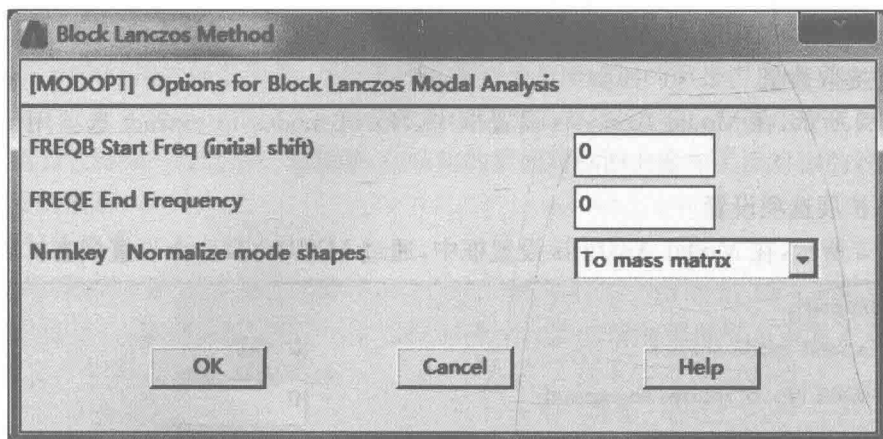


图 2-5 Block Lanczos 方法的选项

上述设置框中, FREQB 和 FREQE 为模态提取的下限频率和上限频率, 单位是 Hz, 下限频率 FREQB 用于过滤一些低频模态, 上限频率 FREQE 的缺省为 $1e8$, 实际上一般结构的频率不可能达到此上限, 其意义是允许提取全部要求的模态数。

Normalize mode shapes 选项用于设置振形归一化方法, 可选择基于质量矩阵的归一化 (To mass matrix), 也可选择基于最大位移分量归一化 (to unity)。所谓的关于质量矩阵的归一化, 是指结构中各质量的模态位移均按照一定比例缩放, 使得缩放后的振型向量的转置乘以质量矩阵再乘以缩放后的振型向量等于 1; 而关于最大位移分量归一化, 则是将振形的最大位移置 1, 其他自由度对应的位移分量按比例缩放。

② Supernode 方法的选项

如果在 Modal Analysis 设置框中选择 Supernode 方法, 当按 OK 关闭 Modal Analysis 设置框后, 会接着打开 Supernode Modal Analysis 设置框, 如图 2-6 所示。

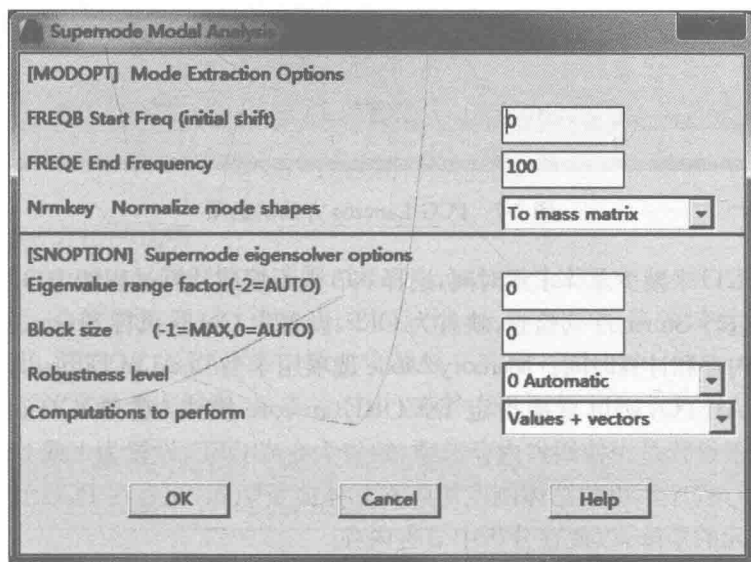


图 2-6 Supernode 方法的选项

上述设置框中, FRQB、FREQE、Normalize mode shapes 这几个选项的意义同前。对于 Supernode 方法, FREQE 值缺省为 100 Hz, 为了保持求解效率, 通常不建议把 FREQE 设置得过高, 对一般的工程问题不要高于 5 000 Hz。因为 FREQE 设置得越高, 将会用更多的计算时间以提取更多的特征值。如果像其他方法一样设置为缺省的 $1e8$, 则可能占用过多的计算时间去计算大量的高频模态而无法较快得到所需要的结果。

③ PCG Lanczos 方法的选项

如果在 Modal Analysis 设置框中选择 PCG Lanczos 模态计算方法, 当按 OK 关闭 Modal Analysis 设置框后, 会接着打开 PCG Lanczos Modal Analysis 设置框, 如图 2-7 所示。

在此设置框中, FRQB 及 REQE 选项的意义同前。对于 PCG Lanczos 方法, 还需通过 PCGOPT 命令设置 PCG 选项, 其中 Level of Difficulty 为问题的复杂水平, 缺省为 AUTO 或 0, 可根据问题复杂程度(矩阵的病态程度)设置为 1 到 5, 水平越高则所需的内存和计算时间也越多。Reduced I/O 选项用于缩减计算过程的 I/O, 缺省为 AUTO 程序选择, 选择 YES 时, 通过

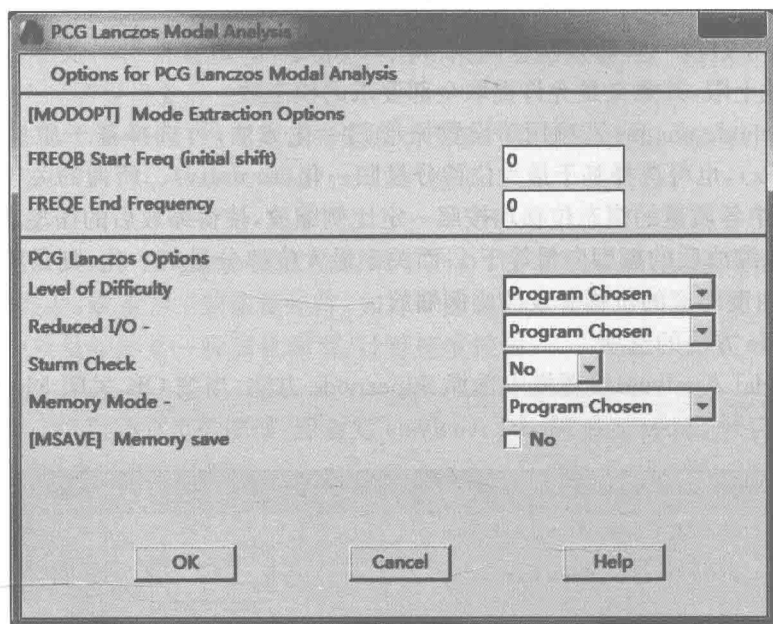


图 2-7 PCG Lanczos 方法的选项

缩减计算过程的 I/O 来减少总体求解时间,选择 NO 则不缩减计算过程的 I/O。Sturm Check 选项用于控制是否进行 Sturm 序列检查,缺省为 OFF,设置为 ON 时执行 Sturm 序列检查,这一检查会耗用大量的内存和计算时间。Memory Mode 选项用于当 Level of Difficulty=5 时控制内存的模式,缺省为 AUTO,还可直接指定 INCORE(in-core 模式)或 OOC(out-of-core 模式)。MSAVE 命令用于设置是否使用省内存选项,缺省为 0 或 OFF,设置为 1 或 ON 时打开省内存开关,这种情况下,程序不组装总体刚度矩阵和总体质量矩阵,而是在 PCG Lanczos 迭代过程中重新形成各单元的矩阵,以便在分析中节省内存。

④ Unsymmetric 方法的选项

如果在 Modal Analysis 设置框中选择 Unsymmetric 模态计算方法,当按 OK 关闭 Modal Analysis 设置框后,会接着打开 Unsymmetric Modal Analysis 设置框,如图 2-8 所示。其中各选项的意义同前,这里不再重复介绍。

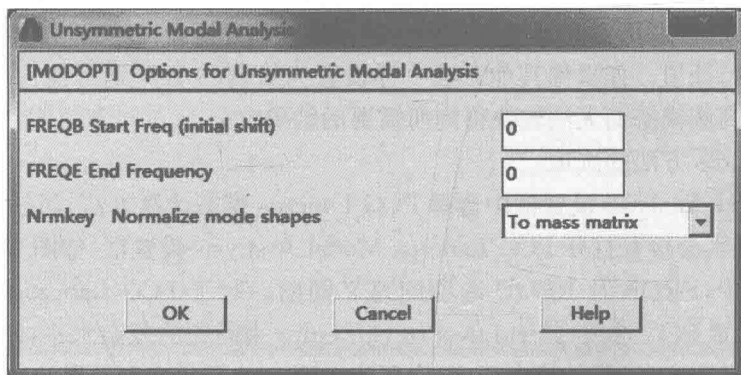


图 2-8 Unsymmetric 方法的选项