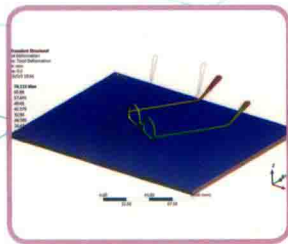
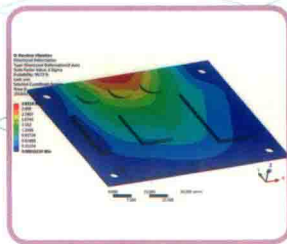
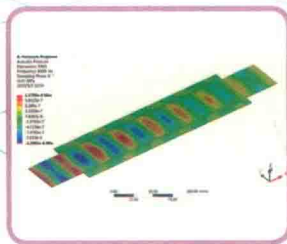


ANSYS Workbench 有限元分析实例详解

(动力学)

周炬 苏金英 著



专业针对性强

专门解决 ANSYS Workbench 动力学分析的各种问题

内容独创性强

书中众多内容是作者多年从事有限元分析的经验总结

案例实用性强

所有案例均来自工程实践，是理论与实践结合的典范

配套资源丰富

书中案例及配套资源高达50GB，在读者交流群提供下载



ANSYS Workbench 有限元分析实例详解



(动力学)

周炬 苏金英 著

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (CIP) 数据

ANSYS Workbench有限元分析实例详解. 动力学 / 周炬, 苏金英著. — 北京: 人民邮电出版社, 2019.7
ISBN 978-7-115-51065-5

I. ①A… II. ①周… ②苏… III. ①有限元分析—应用软件 IV. ①O241.82-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第065086号

内 容 提 要

本书系统、全面地阐述了 ANSYS Workbench 动力学分析过程中遇到的各种问题, 从工程实例出发, 侧重解决 ANSYS Workbench 的实际操作和工程问题。

本书共分 5 章, 第 1 章讲解了动力学的基本知识; 第 2 章介绍了 ANSYS Workbench 的模态分析, 包括普通模态、自由模态、线性摄动模态、模态拓扑、阻尼模态、子结构模态、转子模态和声场模态; 第 3 章介绍了 ANSYS Workbench 的谐响应分析, 包括预应力谐响应、谐响应反计算、谐响应子模型、基础激励谐响应、黏弹性材料谐响应、转子谐响应和声场谐响应; 第 4 章介绍了 ANSYS Workbench 的谱分析和随机振动分析, 重点讲解了基本原理以及随机振动的疲劳分析和声场的谱分析; 第 5 章介绍了 ANSYS Workbench 的瞬态动力学分析, 包括刚体动力学、非线性、复合材料、转子动力学和声场等相应模型。

本书工程背景深厚, 内容丰富新颖, 重点突出, 讲解详尽, 主要面向 ANSYS Workbench 软件的初级和中级用户, 适合机械、材料、土木、能源、汽车交通、航空航天、水利水电等专业的本科生、研究生、教师、工程技术人员和 CAE 爱好者使用参考。

◆ 著 周 炬 苏金英

责任编辑 王峰松

责任印制 焦志炜

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

北京隆昌伟业印刷有限公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 29

字数: 713 千字

印数: 1-2 500 册

2019 年 7 月第 1 版

2019 年 7 月北京第 1 次印刷

定价: 108.00 元

读者服务热线: (010) 81055410 印装质量热线: (010) 81055316

反盗版热线: (010) 81055315

广告经营许可证: 京东工商广登字 20170147 号

前 言

CAE 是利用计算机辅助求解复杂工程和产品结构各项性能及优化设计等问题的一种近似数值分析方法, 存在于工程的整个生命周期。ANSYS 软件是经典的 CAE 软件之一, 国内应用广泛。近年来 ANSYS 公司收购了多款顶级流体、电磁类软件, 并重点发展 ANSYS Workbench 平台。与 ANSYS 经典界面相比, ANSYS Workbench 具有一目了然的分析流程图, 整个分析就像在做一道填空题。从 ANSYS 12 版本之后, 更多用户转向使用 ANSYS Workbench, 同时有关 ANSYS Workbench 软件的参考书也越来越多。

本书以先进性、科学性、实用性、服务性为原则, 在表达上力求通俗、简洁、直观, 采用对比的方式详细说明了 ANSYS Workbench 动力学分析过程中遇到的各种问题, 以及几种动力学分析模块的区别, 同时详细说明了 ANSYS Workbench 动力学分析时不同模块之间的联系, 对同类问题进行适当扩展, 以处理实际的工程问题。书中不仅详细介绍了软件的操作流程, 而且还清晰地阐述了“为什么要这样操作”“相关参数为什么要如此设置”“同类的问题应该有怎样的分析思路”等关键问题。正所谓不仅知其然, 还知其所以然。书中所讲内容理论联系实际, 文字通俗易懂, 可带领读者轻松掌握 ANSYS Workbench 的分析方法。

全书共 5 章, 第 1 章讲解了动力学的基本知识, 并介绍了低版本 ANSYS Workbench 打开高版本 ANSYS Workbench 的方法; 第 2 章介绍了 ANSYS Workbench 的模态分析, 包括普通模态、自由模态、线性摄动模态、模态拓扑、阻尼模态、子结构模态、转子模态和声场模态, 重点讲解了模态分析的后处理方法; 第 3 章介绍了 ANSYS Workbench 的谐响应分析, 包括预应力谐响应、谐响应反计算、谐响应子模型、基础激励谐响应、黏弹性材料谐响应、转子谐响应和声场谐响应, 特别是本书提出的反计算方法适用于各类计算, 可以极大地提高有限元计算的精度; 第 4 章介绍了 ANSYS Workbench 的谱分析和随机振动分析, 用 Excel 和 ANSYS 对比的方式重点讲解了它们的基本原理, 并讲解了傅里叶变换生成响应谱曲线、静力学和谱分析叠加、DDAM 单位变换、相应的疲劳分析和声场分析等内容; 第 5 章介绍了 ANSYS Workbench 的瞬态动力学分析, 包括模态叠加瞬态分析、包含不同初始条件的瞬态分析、移动载荷的瞬态分析、多体瞬态动力学、非线性、复合材料、转子动力学和声场等模型。

本书包含同类参考书上所没有的大量内容, 而且紧密联系实际工程问题, 例如介绍了利用模态线性叠加分析定义排气管约束位移、非线性模态分析、齿轮模态拓扑优化、模态子结构、反计算、子模型谐响应、基础激励谐响应、黏弹性材料谐响应、PCB 随机振动疲劳分析、利用 Python 处理的齿轮齿条啮合瞬态动力学、Spaceclaim 前处理及对应的转子动力学和声场分析等。

本书主要面对 ANSYS Workbench 软件的初级和中级用户, 对于高级用户也有一定的参考价值。本书可作为机械、材料、土木、能源、汽车交通、航空航天、水利水电等专业的高年级本科生、研究生、教师的教学参考用书, 亦可供相关领域从事产品设计、仿真和优化设计等工作的工程技术人员及广大 CAE 工程师们学习和使用。

本书配套提供有关的模型文件, 读者可以直接在 ANSYS Workbench 15 及以上版本的软件中

打开或导入。本书配套资源可在百度网盘 <https://pan.baidu.com/s/15yHCdcZ6tFHTteCJYP5t8g> 下载，并可在 QQ 群“CAE 基础与提高 389410373”内进行交流。

本书由周炬、苏金英撰写。在写作过程中得到丁德馨教授、雷泽勇教授、邱长军教授、李必文教授、唐德文副教授的悉心指导，在此深表感谢！同时感谢张烨、杨威以及人民邮电出版社对本书出版给予的热心帮助！本书还得到湖南省普通高校“十三五”专业综合改革试点项目——南华大学“机械设计制造及其自动化”的资助。

由于时间仓促，加之本书内容新颖、专业强且作者水平有限，书中难免有不足之处，恳请广大读者批评指正。

资源与支持

本书由异步社区出品，社区（<https://www.epubit.com/>）为您提供相关资源和后续服务。

配套资源

本书提供如下资源：

- 书中彩图文件。

要获得以上配套资源，请在异步社区本书页面中点击 **配套资源**，跳转到下载界面，按提示进行操作即可。注意：为保证购书读者的权益，该操作会给出相关提示，要求输入提取码进行验证。

提交勘误

作者和编辑尽最大努力来确保书中内容的准确性，但难免会存在疏漏。欢迎您将发现的问题反馈给我们，帮助我们提升图书的质量。

当您发现错误时，请登录异步社区，按书名搜索，进入本书页面，点击“提交勘误”，输入勘误信息，点击“提交”按钮即可。本书的作者和编辑会对您提交的勘误进行审核，确认并接受后，您将获赠异步社区的 100 积分。积分可用于在异步社区兑换优惠券、样书或奖品。



The screenshot shows a web form titled "提交勘误" (Submit Error). At the top, there are three tabs: "详细信息" (Detailed Information), "写书评" (Write Review), and "提交勘误" (Submit Error). Below the tabs, there are three input fields: "页码:" (Page Number), "页内位置 (行数):" (Page Position (Line Number)), and "勘误印次:" (Error Edition). Below these fields is a rich text editor with a toolbar containing icons for bold (B), italic (I), underline (U), strikethrough (ABC), bulleted list, numbered list, link, and unlink. At the bottom right of the form, there is a "字数统计" (Character Count) label and a "提交" (Submit) button.

扫码关注本书

扫描下方二维码，您将会在异步社区微信服务号中看到本书信息及相关的服务提示。



与我们联系

我们的联系邮箱是 contact@epubit.com.cn。

如果您对本书有任何疑问或建议，请您发邮件给我们，请在邮件标题中注明本书书名，以便我们更高效地做出反馈。

如果您有兴趣出版图书、录制教学视频，或者参与图书翻译、技术审校等工作，可以发邮件给我们；有意出版图书的作者也可以到异步社区在线提交投稿（直接访问 www.epubit.com/selfpublish/submission 即可）。

如果您是学校、培训机构或企业，想批量购买本书或异步社区出版的其他图书，也可以发邮件给我们。

如果您在网上发现有针对异步社区出品图书的各种形式的盗版行为，包括对图书全部或部分内容的非授权传播，请您将怀疑有侵权行为的链接发邮件给我们。您的这一举动是对作者权益的保护，也是我们持续为您提供有价值的内容的动力之源。

关于异步社区和异步图书

“异步社区”是人民邮电出版社旗下 IT 专业图书社区，致力于出版精品 IT 技术图书和相关学习产品，为作译者提供优质出版服务。异步社区创办于 2015 年 8 月，提供大量精品 IT 技术图书和电子书，以及高品质技术文章和视频课程。更多详情请访问异步社区官网 <https://www.epubit.com>。

“异步图书”是由异步社区编辑团队策划出版的精品 IT 专业图书的品牌，依托于人民邮电出版社近 30 年的计算机图书出版积累和专业编辑团队，相关图书在封面上印有异步图书的 LOGO。异步图书的出版领域包括软件开发、大数据、AI、测试、前端、网络技术 etc。



异步社区



微信服务号

目 录

第1章 动力学基础	1	2.8.2 流固耦合模态(湿模态) 分析	161
1.1 动力学基本解析	5	2.9 总结	170
1.2 静力学分析与动力学分析的 区别	7	第3章 谐响应	175
1.3 低版本程序打开高版本文件的 过程	14	3.1 谐响应分析之计算原理	175
第2章 模态分析	28	3.2 预应力谐响应分析	176
2.1 模态分析之计算原理	28	3.3 谐响应之反计算分析	189
2.2 普通模态及自由模态分析	30	3.4 谐响应之子模型分析	198
2.2.1 模态分析之固有频率 研究	30	3.5 谐响应之基础激励分析	218
2.2.2 模态分析之振型研究	40	3.6 谐响应之黏弹性材料分析	231
2.2.3 模态分析之线性叠加	57	3.7 谐响应之转子动力学分析	239
2.3 线性摄动模态分析	64	3.8 谐响应之声场分析	250
2.3.1 线性摄动模态分析之 应力刚化和旋转软化	65	3.8.1 消声器声场分析	254
2.3.2 非线性模态分析	71	3.8.2 外激励辐射声场分析	263
2.4 模态分析之拓扑优化	81	3.9 总结	273
2.4.1 模态分析之拓扑优化 基本实例	82	第4章 谱分析和随机振动	275
2.4.2 齿轮减重拓扑优化设计 基本实例	98	4.1 响应谱分析之频谱定义	275
2.5 含阻尼的模态分析	113	4.2 响应谱分析之基本原理	282
2.5.1 复模态分析基本 实例	115	4.3 响应谱之基本分析流程	288
2.5.2 非对称复模态分析基本 实例	126	4.4 响应谱之分析实例	299
2.6 模态之子结构分析	133	4.5 随机振动分析之基本原理	313
2.7 转子动力学之模态分析	140	4.6 随机振动之疲劳分析	320
2.8 声场模态分析	152	4.7 声场之谱分析	330
2.8.1 声场模态分析	154	4.8 总结	335
		第5章 瞬态动力学分析	339
		5.1 模态叠加瞬态分析	339
		5.2 瞬态分析之初始条件	350
		5.3 瞬态分析之移动载荷	364
		5.3.1 准静态法之移动载荷 瞬态分析	364

5.3.2 瞬态法之移动载荷 分析	370	5.5 非线性瞬态分析	403
5.4 瞬态分析之多体动力学	378	5.5.1 跌落冲击分析	403
5.4.1 全刚性体 (柔性体) 零件全 Joint 连接的多体 动力学	378	5.5.2 三辊弯曲成型分析	409
5.4.2 刚柔性体零件全 Joint 连接的多体动力学	386	5.5.3 接触磨损分析	414
5.4.3 刚柔性体零件 Joint 和 Contact 连接的多体 动力学	392	5.6 瞬态分析之复合材料	422
		5.7 转子动力学之瞬态分析	430
		5.8 声场之瞬态分析	442
		5.9 总结	448
		参考文献	455

第1章 动力学基础

动力学研究的是已知物体的运动形式求其受载荷情况，或者已知物体的载荷情况求其运动形式。

动力学与静力学的区别如下所示。

- 静力学分析其实是基于一种假设，即载荷和物体的响应不发生变化或随时间变化得非常缓慢，其表现为承受稳态加载条件。但在实际工程中仅进行静力学分析可能是不够的，特别是物体处于随时变化的载荷时。
- 动力学分析是在惯性或阻尼起重要作用时，物体在自由振动下（移除载荷后）的响应特性；或者物体随时间变化情况下的动态响应特性。前者寻找物体的振动特性（固有频率和主振型），以便更好地利用或减小振动。后者研究物体的动态载荷和随时间运动的关系。

使用 ANSYS 进行动力学分析时，必须注意以下事项。

1) 应清晰理解动力学的理论。一些读者在只阅读软件操作说明书后就进行动力学分析，完全不理解软件操作步骤、如何设置参数及后处理的意义，这就产生了许多令人啼笑皆非的问题。例如，为什么不能在模态分析中加载载荷；将模态分析后处理中的应力参数作为结构强度校核指标；进行转子动力学分析时，将模态分析的固有频率作为临界转速等。同时，一些使用者缺乏对各种动力学理论知识体系的理解，导致分析项目时不知所措，无从下手；或者在操作软件时，计算结果不尽如人意，误差非常大。例如，在响应谱分析中软件操作并不难，但是理解操作过程非常难，进而导致设置错误，加之计算结果又难以理解，最终影响计算精度。

2) 网格划分。动力学分析涉及面较静力学分析更广，计算收敛需考虑的问题较静力学更多，因此这导致动力学分析更难收敛。这就需要更好的网格为收敛计算提供前提条件。正如《ANSYS Workbench 有限元分析实例详解（静力学）》中已经提到的，对于三维模型，六面体网格可以减少计算量，容易收敛。但就计算精度而言，四面体与六面体网格的结果相差无几。所以当遇到比较复杂的模型时，纯粹使用四面体或者使用六面体和四面体的组合形式不失为一种较好的处理方法。

3) 动力学分析模块分类。

Workbench 将动力学分为 4 类，包括线性动力学、瞬态分析、刚体动力学和显式动力学。每一类均有不同的模块，相对独立的转子动力学和多体动力学分析也由相应模块组合而成，具体如图 1-1 所示。

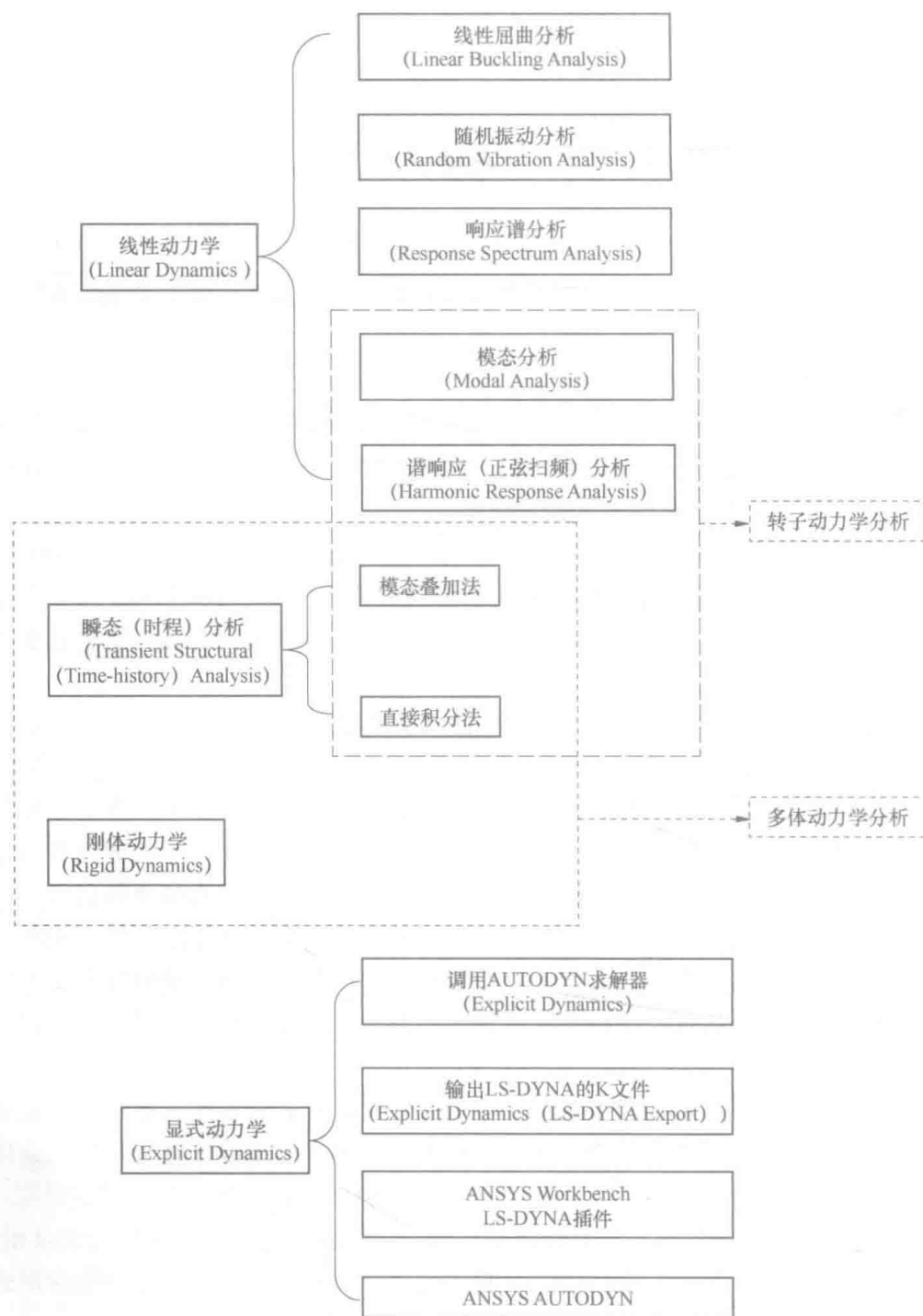


图 1-1 动力学分类

线性动力学主要以模态分析为基础，反映结构为线性的动力学分析。即假设系统的弹性或阻尼力随节点位移和速度呈线性变化，且外力不随节点的位移和速度的变化而变化。线性动力学分析包括模态分析、谐响应分析、线性屈曲分析、响应谱分析和随机振动分析，其中线性屈曲分析严格意义上属于线性动力学范畴，但考虑其常用于描述几何非线性，因此将其置于静力学分析中。

瞬态分析分为模态叠加法和直接积分法，其中模态叠加法可以近似属于线性动力学，因为其唯一可设置的非线性条件为简单的点点接触；直接积分法采用隐式求解器来研究所有非线性的问题。

刚体动力学定义研究对象为刚体，由于刚体不能变形，所以求解的结果没有应力和应变，

只有力、力矩、位移、速度和加速度。Workbench 在这方面不如经典的 Adams 等软件方便（如无法直接定义齿轮副、凸轮副等），但它可以利用接口或插件充实刚体动力学分析。

显式动力学用于描述高度非线性的动力学分析，分别以 LS-DYNA 和 AUTODYN 为求解核心处理各种高速冲击、碰撞等分析。本书限于篇幅，没有讲述该部分内容。

4) 显式算法 (explicit) 和隐式算法 (implicit) 的区别。

以基本动力学基本方程为例进行讲解： $[M]\{\ddot{u}\}+[C]\{\dot{u}\}+[K]\{u\}=\{F(t)\}$ 。

式中 $[M]$ 为质量矩阵； $[C]$ 为阻尼矩阵； $[K]$ 为刚度矩阵； $F(t)$ 为载荷矢量关于时间的函数； $\{\ddot{u}\}$ 为位移对时间的二阶导数，即加速度矢量； $\{\dot{u}\}$ 为位移对时间的一阶导数，即速度矢量； $\{u\}$ 为位移矢量。简而言之，可以将该公式近似为 $Ma + Cv + Ku = F$ 。如果忽略式中左边的第二项和第三项，即变为牛顿第二定律；忽略式中左边的第一项和第三项，即变为低速下黏滞阻力定律；忽略式中左边的第一项和第二项，即变为胡克定律（静力学）。

使用有限元法对动力学常微分方程组进行求解。由数值分析可知，可以采用平衡迭代法和差分法两种方法来求解。前者利用下一时刻物理量（未知）与当前时刻物理量（未知）的增量步关系，对方程组进行迭代求解，每一步都需平衡迭代并存在收敛性，计算量非常大，这称为隐式算法；后者利用上一时刻物理量（已知）与当前时刻物理量（未知）的关系，不用解耦方程可直接计算，不需要平衡迭代，只要时间步长足够小，一般不存在收敛问题，其计算量较隐式算法小得多，这称为显式算法。可以用登山来形容两者：隐式算法类似一个旅行者，在山中不断寻找各种山间小路，如果他没有定位工具，则很容易迷失方向，因此必须不断容错和尝试；显式算法类似一个攀岩者，制定目标后只要不是步伐太大，一步一个脚印，就一定可以攀登成功。

显式算法一般应用于作用时间非常短暂（一般小于 1s，准静态除外），惯性力和冲击效应非常大的工况，如跌落、弹道侵彻和爆炸等，它还包括复杂的接触状态、极大变形、材料磨损和失效等。

两者的主要区别体现在如下几个方面。

- 隐式算法的计算量一般与单元数量的平方成正比，显式算法与单元数量成正比。显式算法更节约计算机硬件成本。
- 隐式算法在对方程组进行求解时，需要对刚度矩阵求逆，因此必须迭代计算。迭代时间步没有万能公式可以验算，一般需要不断尝试。显式算法则要求质量矩阵为对角矩阵，不存在收敛问题，时间步必须小于材料波速。
- 隐式算法由于每个载荷步都进行收敛控制，因此避免了积累误差；显式算法中单元往往采用缩减积分，容易激发沙漏现象，对应力应变的计算结果有较大的影响。

5) 运动学与动力学的区别。

运动学研究物体的运动，但不考虑引起运动的因素，其主要研究对象为位移、速度和加速度。动力学除了研究物体的运动以外，还研究引起运动的因素，研究对象还包括质量和力的影响。例如，动量计算公式为 $\bar{p} = m\bar{v}$ ，外力 \bar{F} 可以引起物体加速运动，其等于动量的变化率，即 $\bar{F} = \frac{d\bar{p}}{dt} = m \frac{d\bar{v}}{dt} = m\bar{a}$ 。

下面以一个简单的物理题说明两者的不同：一个物体沿直线加速运动，其加速度为 a ，初始速度为 v_i ，运动时间为 t ，如图 1-2 所示。

运动学分析如图 1-2a 所示，它不需要考虑运动产生的原因，只需计算最终速度 $v_f = v_i + at$ 。



图 1-2 运动学与动力学

动力学分析如图 1-2b 所示，它不仅考虑了速度、加速度的概念，还需要考虑物体的质量和力的关系，即 $F = ma = m \frac{v_f - v_i}{t}$ 。

在 CAE 中，对物体进行动力学分析时，除了有限元软件外，还有多体动力学软件。典型的多体动力学软件有 Adams、LMS-Motion、RecurDyn 和 SIMPACK 等。有限元软件和多体动力学软件互相联系，如 RecurDyn 提供了 Workbench 的 ACT 插件，它可以在 Workbench 界面下轻松加载。两者又有本质区别，首先有限元基于弹性力学，多用于设计后的复核；多体动力学基于分析力学，多用于设计前的评估。其次有限元需要离散化模型（划分网格）；多体动力学则不需要。再者有限元擅长描述物体变形、应力和应变，特别适用材料的失效、不同物理场的耦合、复杂的接触以及柔性体零件的优化设计等；多体动力学擅长描述物体运动过程中的速度、加速度、受力等复杂的运动关系，特别适用机构的非线性运动关系。

Workbench 中的瞬态动力学模块可计算结构对动态载荷的响应，它不仅可以考虑大的屈曲变形、接触和材料非线性，还可以考虑载荷和接触突变状态、波传播影响，可输出应力和应变、速度和加速度、各种反力和反力矩。由于计算量庞大，往往需要高昂的硬件代价和巨大的时间花费。因此在实际工程分析中，可以在软件中定义部分零件为刚体，这样可以有效减少整个模型的计算量和硬件消耗，也不需要刚性体的应力应变结果，同时又不影响整个结构的动态响应。如果是将所有或部分零件定义为刚体的动力学分析，那么即可认为其为多体动力学。但由于计算机理不同，所以它与常规的多体动力学软件还不尽相同。

6) 转子动力学基本理论。

转子动力学基本方程为：

$$[M]\{\ddot{u}\} + ([C] + [G])\{\dot{u}\} + ([K] - [K_c])\{u\} = \{F(t)\} \quad (\text{转动动坐标系})$$

$$[M]\{\ddot{u}\} + ([C] + [G])\{\dot{u}\} + ([K] + [B] - [K_c])\{u\} = \{F(t)\} \quad (\text{固定坐标系})$$

式中 $[G]$ 为依据转速的陀螺效应矩阵，陀螺效应表现为耦合垂直于旋转轴的旋转自由度； $[B]$ 为依据转速的旋转阻尼矩阵，表现为改变结构刚度，产生不稳定运动； $[K_c]$ 为旋转软化效应刚度矩阵。由此可知，转子动力学方程是动力学基本方程的衍生，主要表现在旋转效应上。典型转子运动学仿真软件有 MADYN、LMS-SAMCEF 等。

转子动力学方程分为固定坐标系和转动动坐标系两种形式。固定坐标系适用于一个或一个以上旋转结构（转子）和一个固定结构（例如，燃气轮机发动机转子定子总成、多轴气涡轮发动机）。其中旋转部分的结构必须轴对称，非轴对称零件必须转化为等效质量。这种坐标系不适用于静态分析，可以生成坎贝尔图计算转子临界转速。转动动坐标系适用于没有固定结构，整个结构只能为单一的旋转结构（例如，前燃气涡轮发动机转子、单轴燃气涡轮发动机），结构不必是轴对称的，这种坐标系适用于静态分析，不适用于坎贝尔图计算转子临界转速。

在 ANSYS 中，共有 3 种形式的转动，分别为相对于总体坐标系的整体结构转动 1，相对于自定义轴的部分结构转动 2，相对于自定义轴的整体坐标系转动 3。分析时可以在上述转

动形式中任选两种。当转动 1 和转动 2 组合时，转动 1 是整体运动，转动 2 是陀螺自转；当转动 1 和转动 3 组合时，转动 3 是整体运动，转动 1 是陀螺自转；当转动 2 和转动 3 组合时，转动 3 是整体运动，转动 2 是陀螺自转。

转子动力学的主要研究对象如下所示。

- 转子的临界转速。临界转速的概念为质量偏心（材料不均匀偏心，例如零件上的槽、键槽等；状态不平衡偏心，例如零件磨损、热变形、灰尘污垢等）的转子在旋转过程中，当转速到达某一数值时，会导致系统出现剧烈振动，该数值即为临界转速。可认为转子及其支撑系统的固有振动频率与该转速的激振频率一致，产生共振。为避免共振，设计转子的临界转速时需远离激励转速的 15%~20%（注意：不同零件的激励转速与工作转速不同。例如，质量不平衡的零件的激励转速等于工作转速，中心不对称的联轴器的激励转速等于 2 倍工作转速，动激励下的离心式压缩机激励转速等于工作转速的 1/2 等）。该研究主要采用模态分析，求得包含稳定性和临界转速的坎贝尔图。
- 稳态不平衡响应。也可用稳态不平衡响应求得转子系统的临界转速，但其主要目的是在不平衡量作用下求解转子及其支撑系统对正弦状态（振幅不随时间变化）的稳态不平衡响应，进而确定如何采取措施来避免最大不平衡响应及减小不平衡响应。该研究采用基于模态叠加法的谐响应分析，对坎贝尔图上的不同路径进行各自谐波响应扫描。
- 瞬态响应。主要针对转子系统不平衡的突然变化、作用在转子系统上的外载荷突然变化或转子系统在变速下工作等情况。转子系统的响应分析包括转子系统的位移、变形以及支撑结构的传递载荷分析，起动加速、制动减速是最常见的瞬态过程。该研究采用瞬态分析，方法 1 采用真正的转子动力学分析（即非线性瞬态分析），根据转动角速度真实地计算转动模型，这是最昂贵的方法（求解时间长，*.rst 文件大）。但是这包括了所有的响应，后处理可以表现一个真实转动的模型。方法 2 采用固定坐标系，用 Coriolis 命令计算陀螺效应，大部分的转子动力学效应可以得到反映，但是在后处理时看不到真实的转动。方法 3 采用旋转坐标系，用 Coriolis 命令计算对应力。方法 2、3 各有优缺点，都不能表现真实的转动。

1.1 动力学基本解析

在动力学中专业名称较多，简要解析如下。

激励：引起系统振动的原因，分为确定性激励和随机性激励。确定性激励可以用一个确定的函数来描述激励，例如正弦函数的简谐激励、阶跃函数的力激励、方波或锯齿波的周期激励、脉冲函数的冲击激励；随机性激励则无法直接用函数来描述，例如瞬时的风力、海浪、地震、车辆在路面行驶等，但这些均表现为一定的统计规律，因此采用概率分布函数或功率谱等方法来表达。激励的主要表现形式为系统的初始扰动（如初始速度和初始位移），作用于系统的周期性载荷（如力激励），系统底座的周期性或随机性运动（基础激励，如加速度）等。

响应：系统在激励作用下的运动形式，表现为位移、速度或加速度。

按激励方式将振动分为以下几种形式。

1) 自由振动。自由振动是指系统不受任何外力，初始扰动在内力或重力作用下产生运动。

动力学方程为 $[M]\{\ddot{u}\}+[C]\{\dot{u}\}+[K]\{u\}=\mathbf{0}$ ，特征是振幅与外界扰动有关，频率为系统固有频率。由于其在数学上表现为无外力状态，因此在模态分析中不能加载外载荷。

2) 强迫振动。强迫振动是指系统在外界周期性载荷激励下（力激励、基础激励等）发生的运动。动力学方程为 $[M]\{\ddot{u}\}+[C]\{\dot{u}\}+[K]\{u\}=\{F(t)\}$ 。特征为振幅和频率都与外界激励有关。

3) 自激振动。自激振动是指系统不受周期性外力激励的影响，仅在系统内部激发及反馈的相互作用下，产生稳定的周期性振动。以典型 Rayleigh 方程为例，表达式为 $\ddot{u}-\epsilon\dot{u}(1-\delta\dot{u}^2)+\omega_0^2u=0$ ，式中的第二项阻尼项为交变阻尼，耗散能量时为正阻尼，吸收能量时为负阻尼。表现为非线性行为，例如机床导轨爬行、机翼颤振、水管中流体的喘振、摩擦啸叫等，特征为振幅与频率均与外界扰动无关，均为系统固有参数。

4) 参激振动。参激振动是指系统受周期性或随机性外力激励的影响，但激励不是以外力形式直接施加于系统的，而是通过系统内参数的周期性改变来间接地实现。例如荡秋千，在最高位伸直腿，在下降时逐渐收腿，这样可以使秋千越荡越高。

动力学基本方程为 $[M]\{\ddot{u}\}+[C]\{\dot{u}\}+[K]\{u\}=\{F(t)\}$ ，在数学上表现为二阶非齐次微分方程，求解该方程共有两种方法，一种为模态叠加法，另一种为直接积分法。

模态叠加法的求解方法是先求出其对应的齐次微分方程 $[M]\{\ddot{u}\}+[C]\{\dot{u}\}+[K]\{u\}=\mathbf{0}$ 的特征根，并根据特征解形式采用待定系数法求出特征解，最后求出二阶非齐次微分方程的通解。如图 1-1-1 所示，一个刚度为 K 的弹簧振子系统，下方挂质量为 M 的物体，垂直方向存在扰动力 $F=B\sin\omega t$ ，忽略重力、弹簧质量和阻尼，求物体的运动规律。

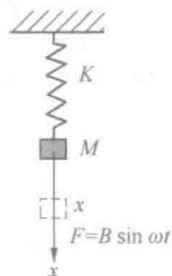


图 1-1-1 弹簧振子系统

解：按动力学通用方程得 $M \frac{d^2x}{dt^2} + Kx = B \sin \omega t$

取对应齐次方程为 $M\lambda^2 + K = 0$ ，特征根为 $\lambda_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{K}{M}} i$ 。

齐次方程通解为：

$$X = C_1 \cos\left(\sqrt{\frac{K}{M}}t\right) + C_2 \sin\left(\sqrt{\frac{K}{M}}t\right) = A \sin\left(\sqrt{\frac{K}{M}}t + \varphi\right) \quad (\text{模态结果})$$

1) 当 $\omega \neq \sqrt{\frac{K}{M}}$ 时，非齐次方程的特征解为：

$x^* = a \cos \omega t + b \sin \omega t$ ，将其代入通用方程，可得 $a=0, b = \frac{B}{K - \omega^2 M}$ ，则通解为：

$$x = A \sin\left(\sqrt{\frac{K}{M}}t + \varphi\right) + \frac{B}{K - \omega^2 M} \sin \omega t$$

当 $\omega \approx \sqrt{\frac{K}{M}}$ 时，振幅将非常大，这是共振的表现。

2) 当 $\omega = \sqrt{\frac{K}{M}}$ 时，非齐次方程的特征解为：

$x'' = t(a \cos \omega t + b \sin \omega t)$, 将其代入通用方程可得: $a = -\frac{B}{2\sqrt{KM}}, b = 0$, 则通解为:

$$x = A \sin \left(\sqrt{\frac{K}{M}} t + \varphi \right) - \frac{B}{2\sqrt{KM}} t \cos \omega t$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时, 振幅将非常大。在频率相等的工况下, 随着时间的推移, 振幅越来越大。

虽然模态叠加法简单易用, 但对于非线性系统则难以运用, 因此直接积分法常用于非线性的瞬态分析。由于直接积分法对时间域直接离散, 列出每一段时间域中位移、速度和加速度的关系式, 因此计算过程较模态叠加法要长。直接积分又分为显式算法和隐式算法。

1.2 静力学分析与动力学分析的区别

前文已经讲述静力学分析表现为稳态响应, 动力学分析表现为惯性或阻尼起重要作用的动态响应。下面以一个简单的壳模型例子来解释静力学分析和动力学分析的区别。

(1) 建立模型

在平面上先建立 Sketch1 (草绘 1), 绘制一个长为 100mm, 高为 40mm 的矩形。再建立 Sketch2 (草绘 2), 绘制一个直径为 25mm 的圆, 其位于矩形中心; 选择 Concept→Surfaces From Sketches (以草绘建立平面) 命令, 选择 Sketch1, 建立 Surface Body (面体); 再以 Extrude (拉伸) 命令, 选择 Sketch2, 添加 Imprint Faces (映射面)。如图 1-2-1 所示。

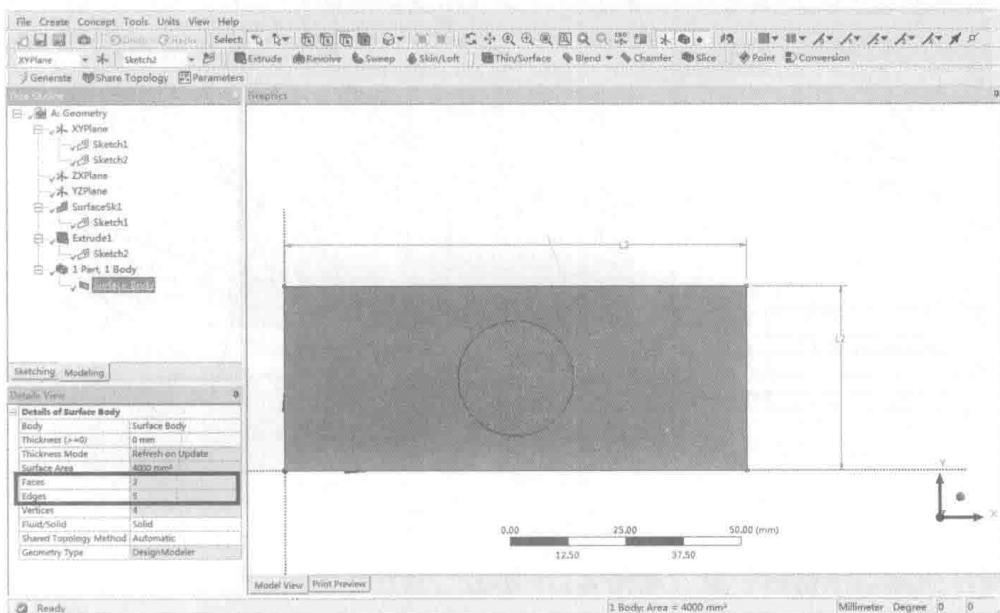


图 1-2-1 建立模型

注意

在图 1-2-1 中框内显示 2 个面、5 条边, 这是中间映射圆的必然结果。

(2) 前处理

先定义分析类型。本模型分别用于静力学分析和动力学分析，因此建立图 1-2-2 所示的分析流程。

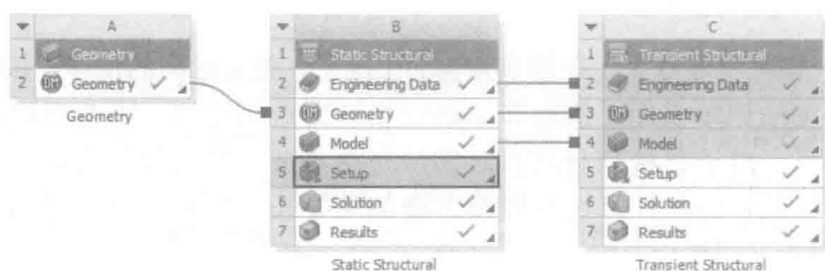


图 1-2-2 建立分析流程

鼠标左键双击 B5 项进入 Mechanical 界面。选择 Geometry→Surfaces Body 定义 Thickness (厚度) 为 1mm，其余默认。

划分网格。鼠标右键单击 Mesh，在弹出的快捷菜单中选择 Insert→Method，如图 1-2-3 所示。在图 1-2-3 中的 1 区 Method 处选择 MultiZone Quad/Tri (以四边形或三角形进行多体划分网格)，在 Surface Mesh Method 处选择 Uniform (网格统一尺寸)；在 2 区的 Free Face Mesh Type 处选择 All Quad (网格均为四边形)，Element Size 处选择 5mm (网格尺寸)；在 3 区的 Preserve Boundaries 处选择 Protected；其余默认。

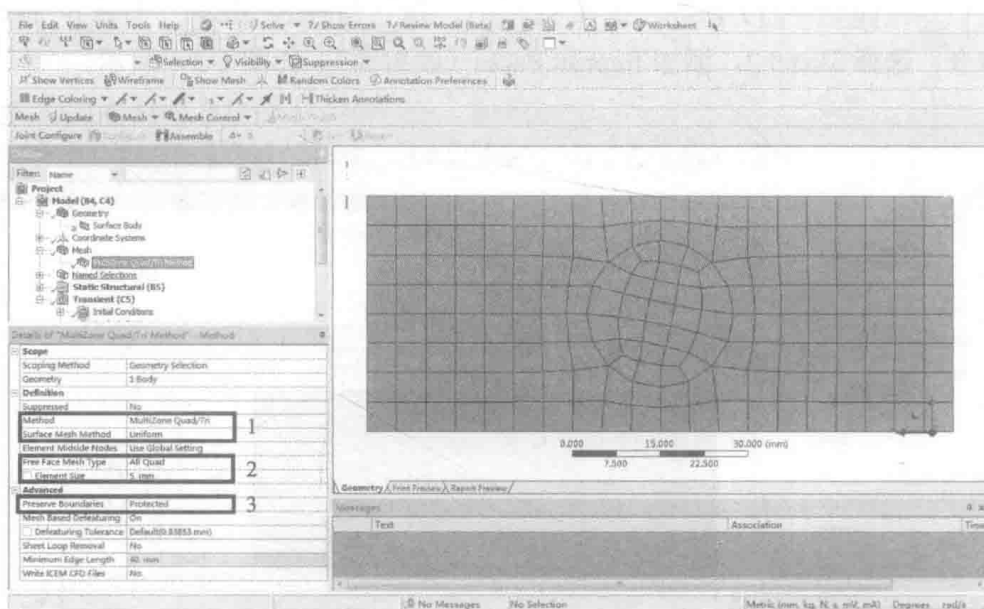


图 1-2-3 划分网格

注意

Preserve Boundaries 的设置非常有意义。在《ANSYS Workbench 有限元分析实例详解 (静力学)》中已经提到，原本模型可以 Sweep (扫略) 划分网格，但由于映射面破坏了整体拓扑关系，因此导致无法扫略。在采用 MultiZone (多体) 进行划分时，对 Preserve Boundaries 处进行设置，可以忽略映射面，使整体网格成为扫略形式。