

知识就是力量 | 从力学学科体系说开去

作者:牛海峰

力学是研究物质机械运动的科学。



力学有着悠久的历史,最早可追溯到古希腊的阿基米德(约公元前287 - 212),并且在欧洲文艺复兴运动以后,人们逐步对力和运动之间的关系有了正确的认识。



英国科学家牛顿继承和发展了前人的研究成果,提出了物体运动三大定律,这也标志着力学开始成为一门科学。



《中国图书馆分类法》力学分类体系

到了20世纪,力学更得到蓬勃的发展,截至目前为止已形成了几十个分支学科。

力学学科基于研究对象、研究方法、研究时代、研究的目的和用途、研究的内容范围、研究的问题和研究的手段可进行不同的分类。本文借鉴广泛采用的《中国图书馆分类法》(以下简称《中图法》)中所研究的力学分支学科,以及对计算机数值方法解决各分支学科力学问题做综合介绍,以帮助读者对力学体系的架构有清晰的认识,并且能够理解计算机数值方法作为极其重要的研究手段如何求解纷繁复杂的物理问题。

现代科技领域研究的三个重要方法是科学试验,科学计算及理论研究。近五十年来随着电子计算机的飞速发展和广泛应用,计算机数值方法已成为求解科学技术问题的主要工具。1960年,Clough首次引用了有限元(finite element)的术语。有限元法的出现,使得经典力学的面貌发生了根本性的变化,它带动了传统学科的发展和新的力学分支,如计算固体力学、计算流体力学、计算细观力学等的产生。本文着重讨论有限单元法及有限体积法在各分支学科的具体应用。

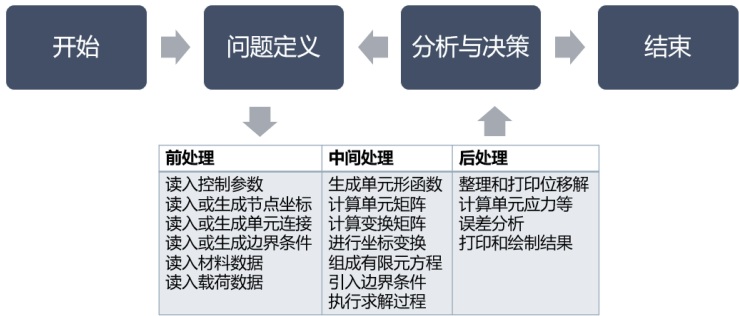
有限单元法(Finite Element Method)是求解微分方程近似解的一般方法,其基本思想是将在一个域内满足平衡微分方程和应力边界条件的边值问题用最小势能原理代替,使得求解微分方程转化为求解积分方程。然后找一组试探解使其满足最小势能原理,这组解就是原问题的近似解。

有限单元法的分析过程包括结构的离散化、单元分析、整体分析和应力的计算等主要环节。其中单元分析的目的是建立单元的位移模式,并通过单元刚度矩阵建立节点力与节点位移的关系。整体分析的目的是将离散化的结构再组装起来,引入边界条件以便求解。求出位移后可以计算应变和应力等物理量,从而完成有限元的分析。



有限元法分析过程流程图

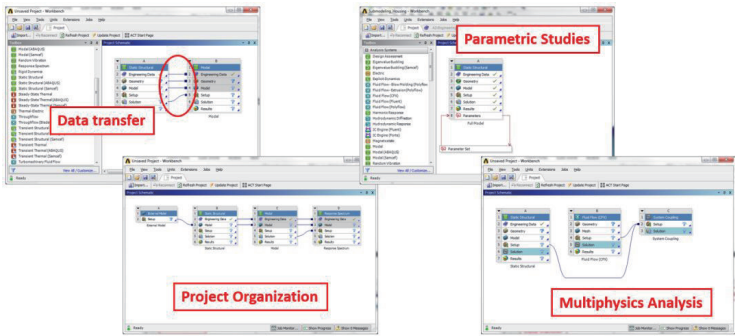
通过计算机的实施过程包括三个基本部分:前、后处理过程以及中间处理环节,其流程如下图所示。Ansys Mechanical通过有限单元法求解复杂的固体力学问题。



有限元法实施流程图

有限体积法(Finite Volume Method)又称为控制体积法。其基本思路是:将计算区域划分为一系列不重复的控制体积,并使每个网格点周围有一个控制体积;将待解的微分方程对每一个控制体积分,便得出一组离散方程。离散方程的物理意义,就是因变量在有限大小的控制体积中的守恒原理,如同微分方程表示因变量在无限小的控制体积中的守恒原理一样。有限体积法得出的离散方程,要求因变量的积分守恒对任意一组控制体积都得到满足,对整个计算区域,自然也得到满足。Ansys FLUENT/CFX使用有限体积法求解复杂的流体力学领域相关问题。

对于一款成功的商业软件而言,除了要保证其出色的求解性能(中间处理环节),在实际工程分析中,最大限度的降低有限元工程师的前处理及后处理的精力(或工时),也成为考核有限元软件成功的一个至关重要的指标,大型商业软件Ansys Workbench在人机交互方面做得尤为出色。Ansys Workbench界面下图所示。



Ansys Workbench 工作界面

在后续的介绍中我们会看到其在力学学科求解方面的优秀性能,易于操作的界面,友好的开发界面以及面向工程的完美解决方案。



Ansys 产品系列解决方案

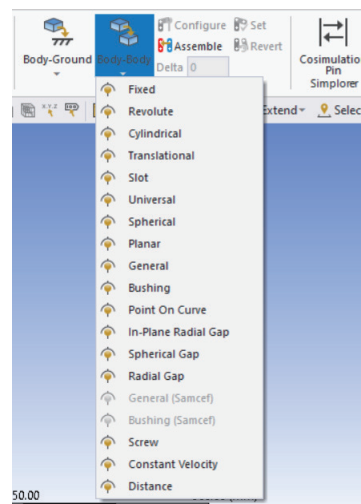
基于上述力学分类体系的分支学科,接下来针对Ansys在其中的应用进行概况性的介绍。

学科一:理论力学

理论力学又称一般力学,或普通力学,它是研究物体机械运动一般规律的科学。理论力学的研究对象是质点、质点系、刚体、多刚体系统,并以生产实践和科学实验归纳出的基本公理和定律为讨论的出发点,采用近代数学工具,进行数学演绎,导出各种以数学形式表达的普遍定理和结论。其内容和方法以伽利略和牛顿总结的基本定律为基础,属于古典力学的范畴。其分支学科包括运动学、静力学、动力学、引力理论、弹道学、分析力学(解析力学)、稳定性理论(回转仪理论)。

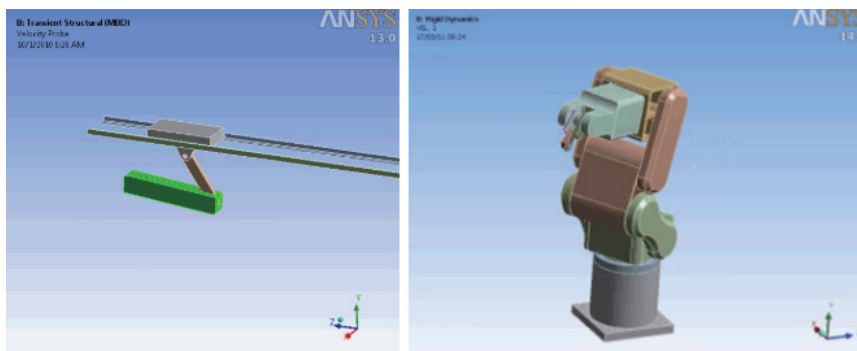
Ansys使用Ansys Rigid Dynamic模块求解理论力学相关的工程问题。它集成于Ansys Workbench环境下,在瞬态动力学分析功能的基础上,专用于模拟由运动副和弹簧连接起来的刚性组件的动力学响应。Ansys Rigid Dynamics直接以参数化方式导入复杂的CAD运动装配模型,提供了完整的运动副类型,并提供了丰富的载荷库,为保证计算精度,Ansys Rigid Dynamics采用了显式积分技术,来快速求解复杂系统的动力学特性,输出位移、速度、加速度和反作用力等历程曲线。

Ansys Rigid Dynamics利用自动探测运动副功能来建立零件之间的连接关系,可以快速根据需要进行运动副更改。Rigid Dynamics利用完整的运动副类型(固定、转动、柱面滑动和转动、平动、滑槽、万向连接、球铰、平面运动、自定义等)弹簧和衬套来建立零件之间的连接,提供精确的定位方法保证零件间的定位,所支持的丰富的运动副类型见右图。



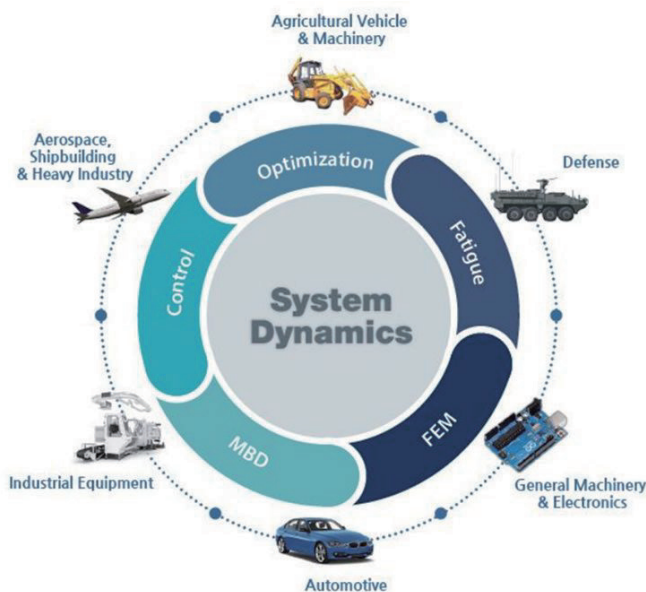
Ansys Rigid Dynamics 丰富的运动副类型

Ansys Rigid Dynamics可以和Mechanical模块的Flexible Dynamics功能在Workbench中实现无缝集成,一次求解同时得到结构运动结果和强度/变形结果等,并支持柔性体的各种非线性特性(如接触、大变形、材料非线性等),刚柔耦合求解功能成为Ansys Mechanical的一大特色,使得其在将理论力学的求解领域拓展到了连续介质力学及固体力学的范畴。



Ansys Rigid Dynamic模型求解案例

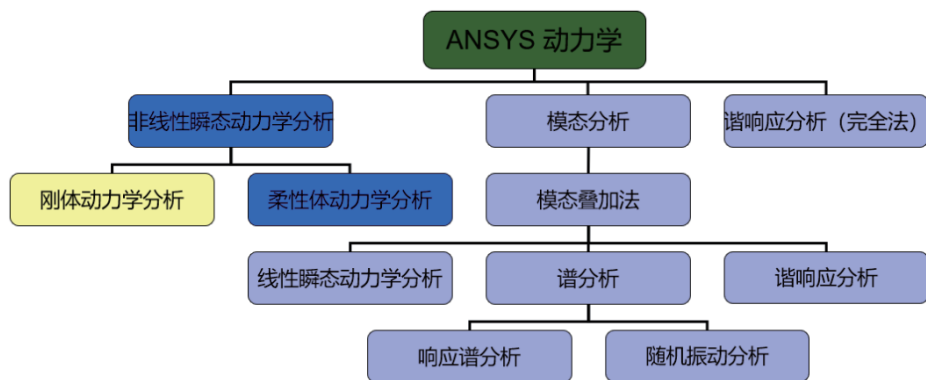
2019年,Ansys推出专业的多柔性体动力学分析工具Ansys Motion,用于以下场景:机械系统的运动学分析、车辆动力学、大变形结构分析、高速大旋转系统、3D接触系统、以及多体运动、结构变形、动力学耐久性分析等。有着更快的仿真速度,特别适用于大规模自由度系统仿真分析。



Ansys Motion 多柔性体动力学分析工具

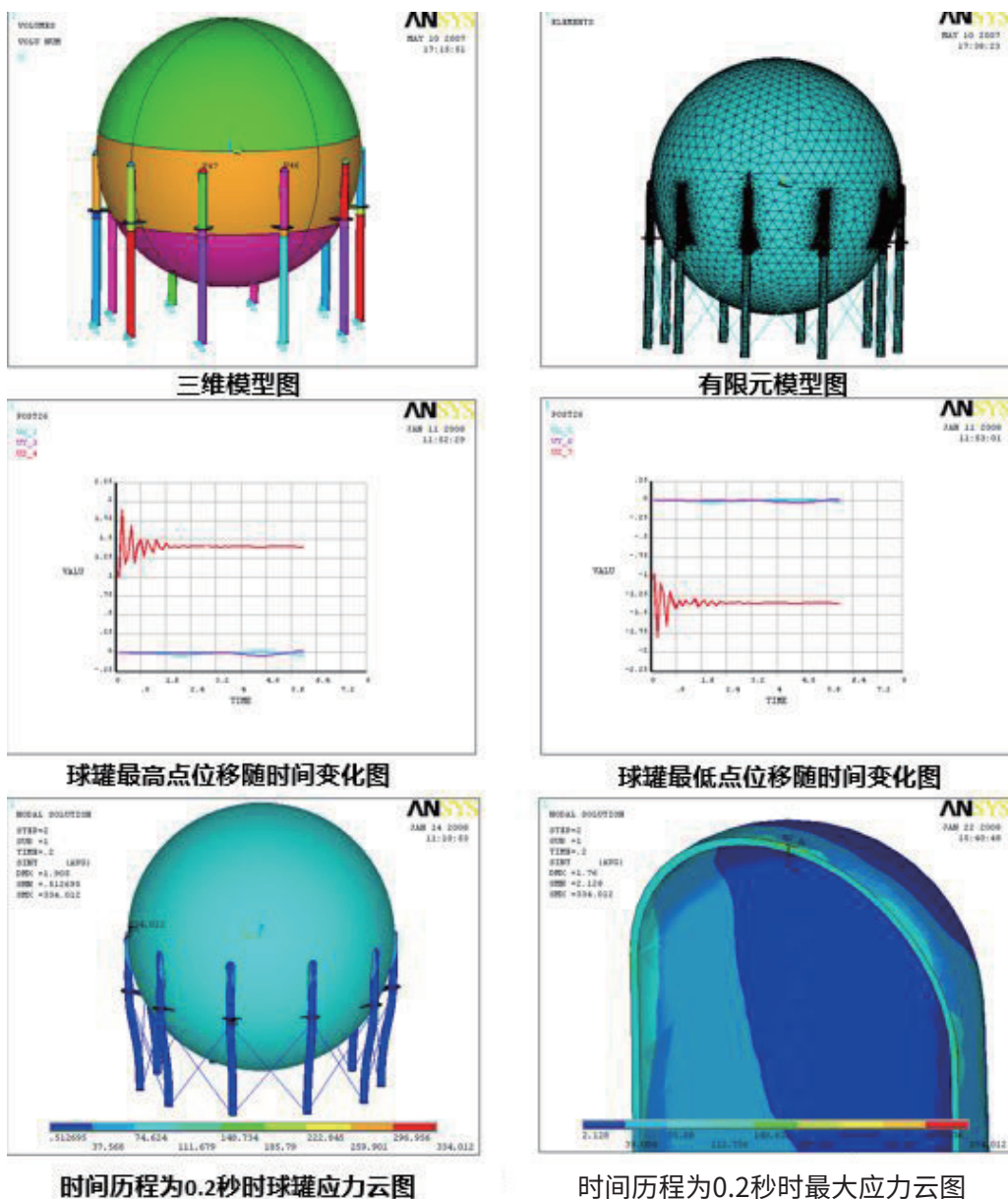
学科一: 振动理论

振动理论是借助于数学、物理、实验和计算技术探讨各种振动现象的机理, 阐明振动的基本规律, 为合理解决实践中遇到的各种振动问题提供理论根据的学科, 又称振动学。其研究内容包括线性振动, 非线性振动, 自激振动和参数振动, 随机振动, 有限自由度体系的振动, 弹性体的振动, 结构振动, 减振、隔振理论和振动测量技术。Ansys利用振动理论的科学研究成果, 通过动力学的各模块求解工程领域中振动问题。



Ansys 动力学分析求解方法一览图

典型的Ansys动力学求解案例见下图所示。



学科三：连续介质力学

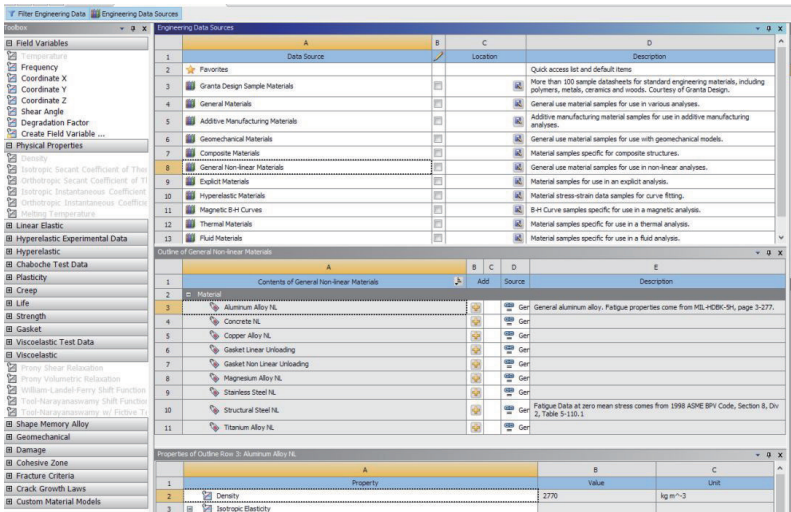
连续介质力学是研究连续介质宏观力学行为的学科。基本假设是“连续介质假设”：即认为真实流体或固体所占有的空间可以近似地看作连续地无空隙地充满着“质点”，这一假设忽略物质的具体微观结构，而用一组偏微分方程来表达宏观物理量（如质量、数度、压力等）。其基本内容为：(1) 一切连续介质都必须满足的共同的普遍原理，如连续性方程、能量方程、不等式、运动方程及运动学关系（包括变形几何学、运动学）等；(2) 各种理想化物质的本构关系；(3) 特殊理论。如弹性理论、塑性理论、粘弹性理论、粘弹塑性理论等；(4) 问题的求解、解析方法及数值方法。弹性体力学和流体力学有时也综合称为连续介质力学。研究对象包括固体、弹性、塑性、流体（包括牛顿流体和非牛顿流体）等。Ansys结构模块Mechanical与流体模块(Fluent和CFX)遵循连续介质力学的普遍原理，如质量守恒、动量定理、能量守恒等。

学科四：固体力学

固体力学是研究可变形固体在外界因素(如载荷、温度、湿度等) 作用和影响下,其内部质点的位移、运动、应力、应变和破坏等规律的学科。固体力学根据研究内容分以下学科材料力学、结构力学、弹性力学、塑性力学、粘弹塑性介质力学、强度理论、变形固体动力学和实验应力分析。

Ansys Mechanical提供目前全球最强大的固体力学求解功能,材料力学、结构力学、弹性力学、塑性力学、粘弹塑性介质力学、强度理论和变形固体动力学学科,已经完全集成在Ansys Workbench平台下。除刚性体分析外, Mechanical的其他模块默认分析均为可变形体或柔性体。

Ansys Workbench自带的材料库包括具备完善的材料模型库(>500种常用的工程材料),包括线弹性材料模型、各向异性材料、正交各向异性材料、温度相关材料模型等,对常用材料提供完备的参考数据,全面支持自定义各种材料本构关系,如线性材料模型(包括各向异性的线性材料模型、温度相关的线性材料模型)、非线性材料模型(超弹性材料、塑性材料、应变率相关的塑性材料、材料损伤模型)等。



Data Source	Location	Description
1	Granta Design Sample Materials	Quick access list and default items.
2	General Materials	More than 320 sample definitions for standard engineering materials, including polymers, metals, ceramics and woods. Courtesy of Granta Design.
3	Additive Manufacturing Materials	General use material samples for use in various analyses.
4	Geomechanical Materials	Additive manufacturing material samples for use in additive manufacturing analyses.
5	Composite Materials	General use material samples for use with geomechanical models.
6	General Non-linear Materials	Material samples specific for composite structures.
7	Explicit Materials	General use material samples for use in non-linear analyses.
8	Hyperelastic Materials	Material samples for use in an explicit analysis.
9	Hydrostatic Materials	Material stress-strain data samples for curve fitting.
10	Magnetic B-H Curves	B-H Curve samples specific for use in a magnetic analysis.
11	Thermal Materials	Material samples specific for use in a thermal analysis.
12	Fluid Materials	Material samples specific for use in a fluid analysis.

Ansys Workbench材料数据库

Ansys于2019年初收购的GRANTA专门负责材料数据相关产品的研发,该产品系列将为客户构建一个协同的统一材料数据源,形成为产品设计和仿真分析服务的企业级材料信息管理系统。详见[\[GRANTA: 企业智能材料数据管理方案\]](#)

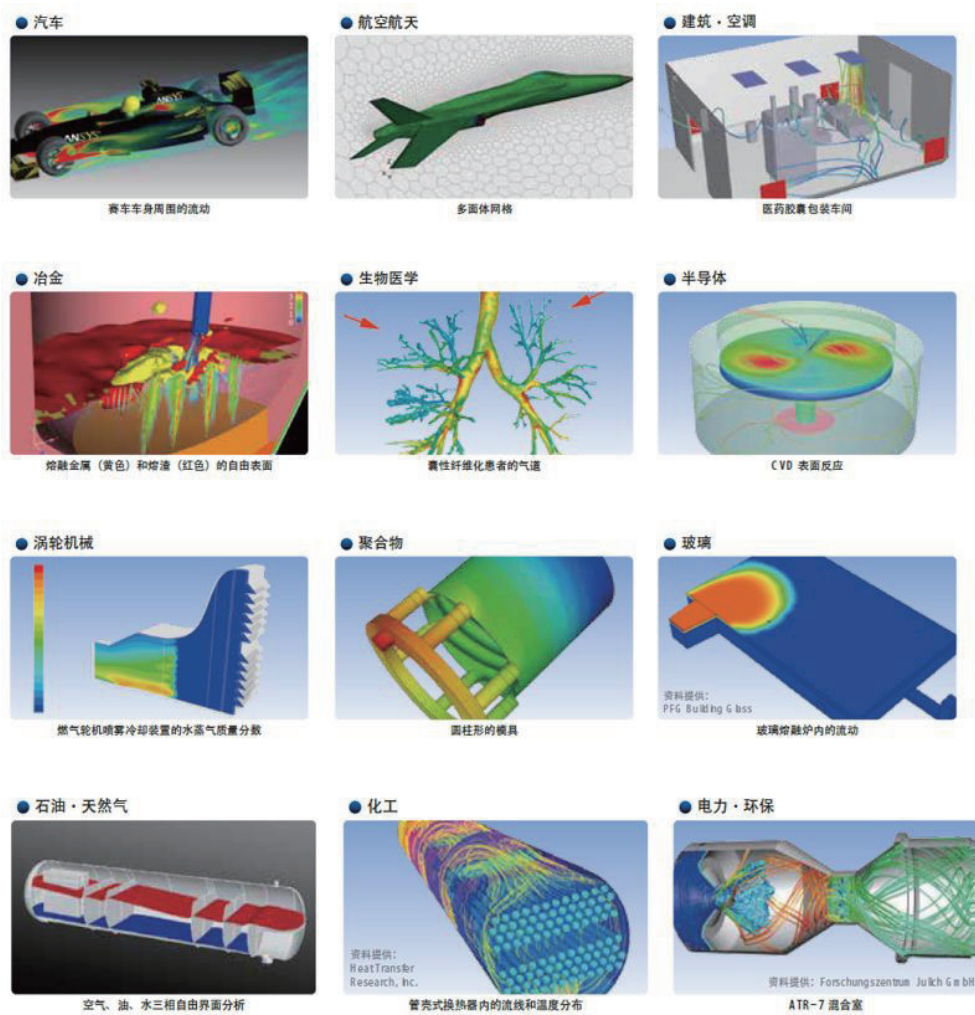
学科五：物理力学

物理力学是从物质的微观结构及其运动规律出发,运用近代物理学、物理化学和量子化学等学科的成就,通过分析研究和数值计算对介质和材料的宏观现象及其运动规律作出微观解释。物理力学中的问题可以分为两大类:一类是属于平衡现象,例如物态方程、比热、化学平衡等,对于这类问题,物理力学主要借助统计力学的方法。另一类是属于不平衡现象,如物质的扩散、热传导、粘滞性、化学反应等。解决这些问题要借助于非平衡统计力学和不可逆过程热力学理论,必须在一开始就要引入现象的具体模型。

学科六：流体力学

流体力学是研究在各种力作用下流体本身的静止状态、运动规律、以及流体和固体壁面、流体和流体之间、流体与其他运动形态之间相互作用的学科。流体是液体和气体的总称,大气和水是最常见的两种流体。流体力学既含有基础理论,又有极广泛的应用范围。Ansys Fluent/CFX 作为Ansys的主流产品,在该领域有着悠久的发展历史及优秀的解决方案。

Ansys Fluent/CFX 提供二维平面、二维轴对称、带旋流的二维轴对称、三维流动分析, 稳态 / 瞬态流动, 并行计算, 网格自适应, 惯性或非惯性坐标系, 流固耦合分析, 多个参考坐标系统和滑动网格, 通用的非结构化网格求解器, 亦可使用多面体网格。对流项离散格式, 一阶 / 二阶迎风格式、三阶精度 MUSCL 格式、乘方格式、QUICK、中心差分格式 (LES 使用)。基于压力的求解器 (分离式、耦合式) 和基于密度的求解器 (隐式算法、显式算法)。多种求解器支持求解大范围马赫数内的流动, 内置移动网格功能, 可根据需要选择多种网格移动变形模式。因此, 可以灵活应对流体计算中出现的非常复杂的形状变化, 可通过用户自定义程序 (UDF) 便捷定义刚体的六自由度运动。



Ansys Fluent/CFX 的典型应用案例

学科七:流变学

流变学是研究物质或材料流动和变形的学科, 它是由力学、化学、工程科学的交叉和综合而产生的边缘学科。
流变学研究范畴见下图。Ansys Mechanical, Flunent/CFX 两款产品可以完美地求解该领域的问题, 其中蠕变材料模型详见学科四中的介绍。

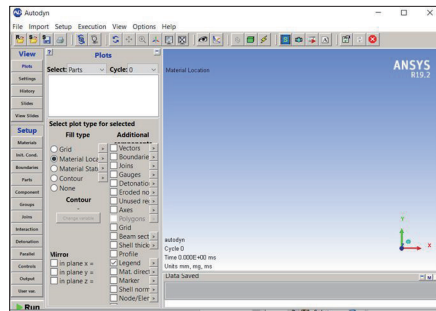
物质状态	液 体		固 体	
性能表现	(理想)粘性流体行为	粘弹性流动行为	粘弹性变形行为	(弹性)变形行为
依据原理	Newton定律	Maxwell定律	Kelvin/Voigt定律	Hook定律
研究方法	流动/粘度曲线	蠕变实验 弛豫实验 振荡实验		
	稳态流变学	动态流变学		

流变学研究内容

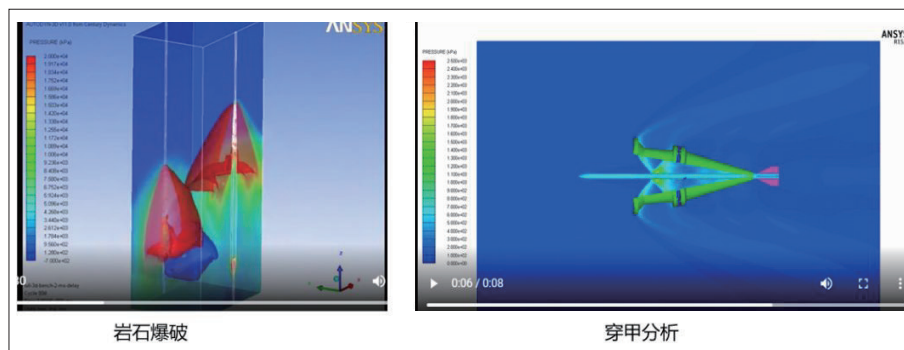
学科八:爆炸力学

爆炸力学是研究爆炸的发生、发展规律以及爆炸力学效应的利用和防护的学科。它从力学角度研究化学爆炸、核爆炸、电爆炸、粒子束爆炸(也称辐射爆炸)、高速碰撞等能量突然释放或急剧转化的过程和由此产生的冲击波(又称激波)、高速流动、大变形和破坏、抛掷等效应。

Ansys Autodyn 可以模拟材料对于冲击、高压或爆炸所产生的短期重载的响应。Autodyn 非常适用于模拟大尺寸材料的形变或失效。Autodyn提供了先进的解决方案,流体、固体和气体的交互,材料的相变,以及冲击波的传播等复杂的物理现象均可在 Autodyn 中建模。此程序与 Ansys Workbench用户界面集成,几十年来在易用性方面一直占据业界领先地位。Autodyn 可以利用拉格朗日域为固体建模,利用欧拉和 SPH(光滑粒子流体力学)为流体建模,可以在一个模型中使用多个求解器,并且为各求解域之间的交互建模,以获得有效、准确的结果。



Ansys Autodyn 功能界面



Ansys Autodyn 应用案例

值得注意的是,Ansys在2019年收购了显式动力学分析的行业领导者LS-DYNA,Ansys LS-DYNA广泛用于金属成型、冲击、碰撞、爆炸及流固耦合研究,此次收购后Ansys将在结构、流体、电磁、光学、安全和机器学习的仿真领域都拥有强大实力,将为全球汽车制造商提供全面的自动驾驶和电动汽车解决方案。详见[【Ansys与LS-DYNA开发者LSTC签署最终收购协议】](#)

学科九:应用力学

应用力学是力学的一个重要分支学科。由于力学在现代科学技术的广泛应用,因而开拓了很多新领域,如工程力学、天体力学、地质力学及生物力学等等。对于计算机数值方法而言,结合不同的应用领域,其求解的控制方程,假设条件及研究范围都各有侧重,由于力学的具体应用场景庞杂而且广泛,这里不做详述。

物理学的基础学科——力学,推动着人类逐步深入地认识世界、改造世界,而数值计算方法作为认识物理世界必不可少的工具发挥着越来越重要的作用,基于计算机数值方法的Ansys软件供应商将集成最先进的分析技术、材料科学和多物理场耦合分析技术助力工业企业实现梦想。

参考文献:

- [1] 曾攀. 有限元分析基础教程, 高等教育出版社, 2009
- [2] 王勖成 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法, 清华大学出版社, 1997
- [3] 杨庆生 编著, 现代计算固体力学, 北京: 科学出版社, 2007
- [4] 钱学森, 物理力学讲义
- [5] 郭应征 李兆霞, 应用力学基础

Ansys 中国 | www.ansys.com.cn

咨询电话: 400 819 8999 邮箱: info-china@ansys.com 中国分公司: 北京 上海 成都 深圳

所有 ANSYS, Inc. 品牌、产品、服务和名称、徽标、口号均为 ANSYS, Inc. 或其子公司在美国或其它国家的注册商标或商标。所有其它品牌、产品和服务和名称或商标是各所有者的财产。



官方微博



官方微信