

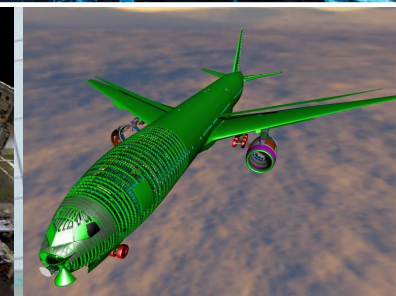
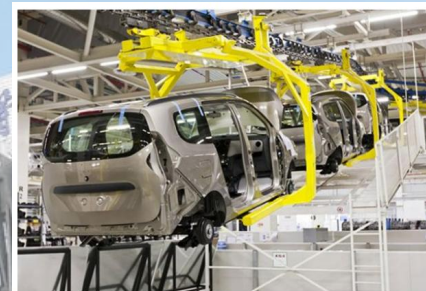


电子科技大学(深圳)高等研究院

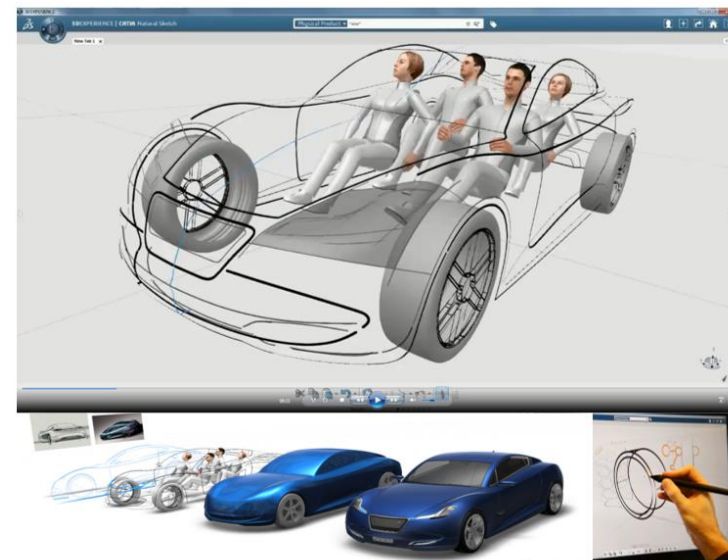
《数字化设计与制造》



任课教师: 孙勇¹, 张东星²
联系方式: 1.yong_sun@uestc.edu.cn,
2.zhangdongxing@uestc.edu.cn



第四章 数字化仿真技术



第一节 建模仿真步骤及有效方法

第二节 主流数字化建模软件简介

第三节 有限元理论和应用

◆ 数字化仿真的优势

- 提高产品质量：再现全生产周期的各种复杂工作环境。
- 缩短产品开发周期：各环节的仿真、样机试验。
- 降低产品开发成本：虚拟样机试验。
- 完成复杂产品的操作和使用训练：再现系统实际工作过程，设计各种“故障”，“险情”。

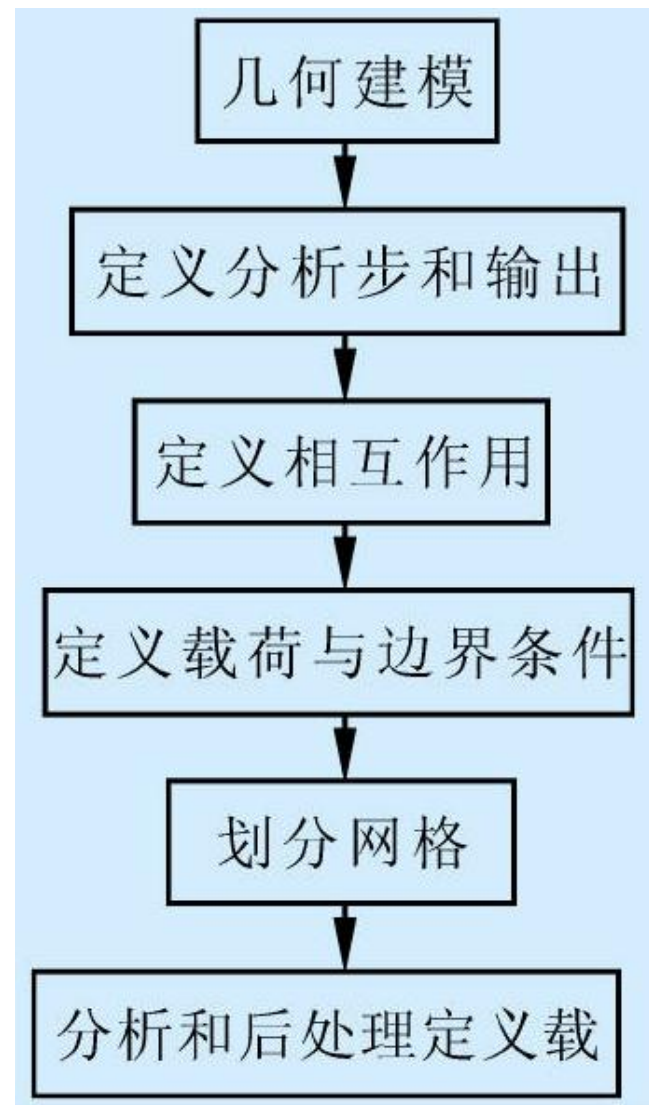
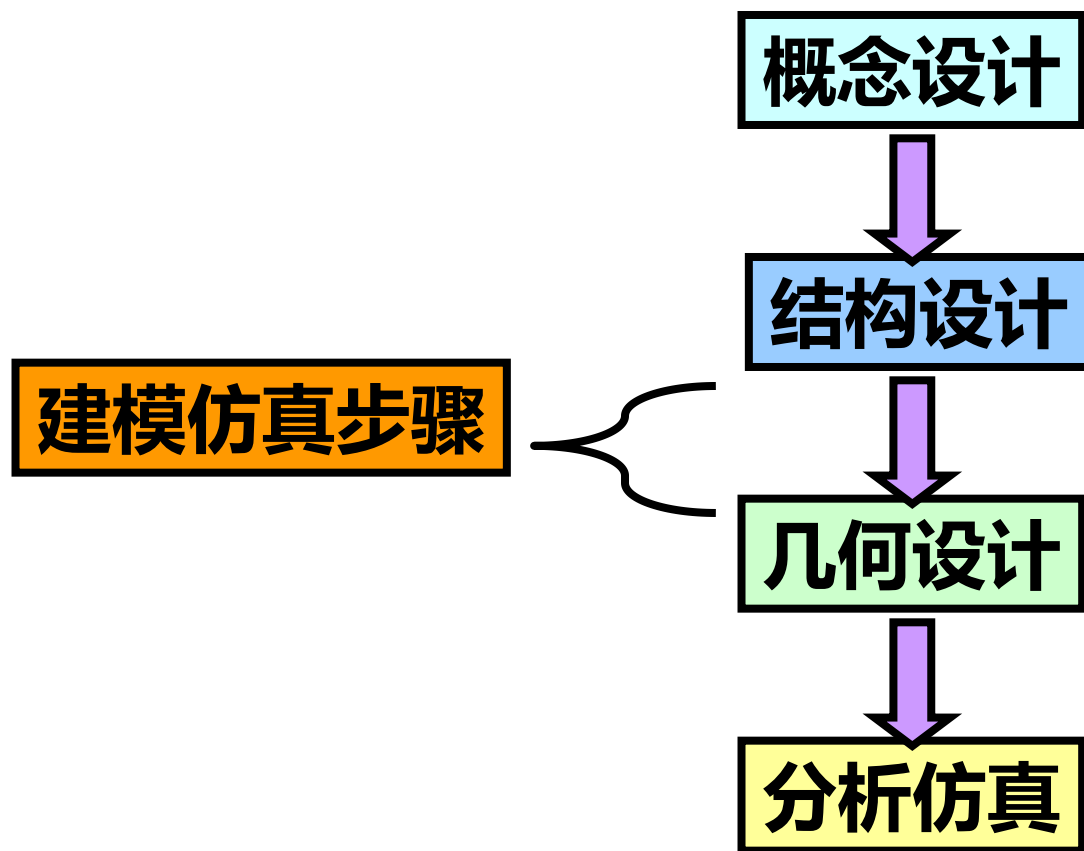
◆ 仿真技术在制造系统中各阶段的应用：

- **概念化设计阶段：**对设计方案进行技术、经济分析和可行性研究
- **设计建模：**建立系统及零部件模型，判断产品外形、质地及物理特性是否满意
- **设计分析：**分析产品及系统的强度、刚度、振动、噪声、可靠性等性能指标
- **设计优化：**调整系统结构及参数，实现系统特定性能或综合性能的优化
- **制造：**刀具加工轨迹、可装配性仿真，及早发现加工、装配中可能存在的问题
- **样机试验：**系统动力学、运动学及运行性能仿真，虚拟样机试验，以确认设计目标
- **系统运行：**调整系统结构及参数，实现性能的持续改进和优化

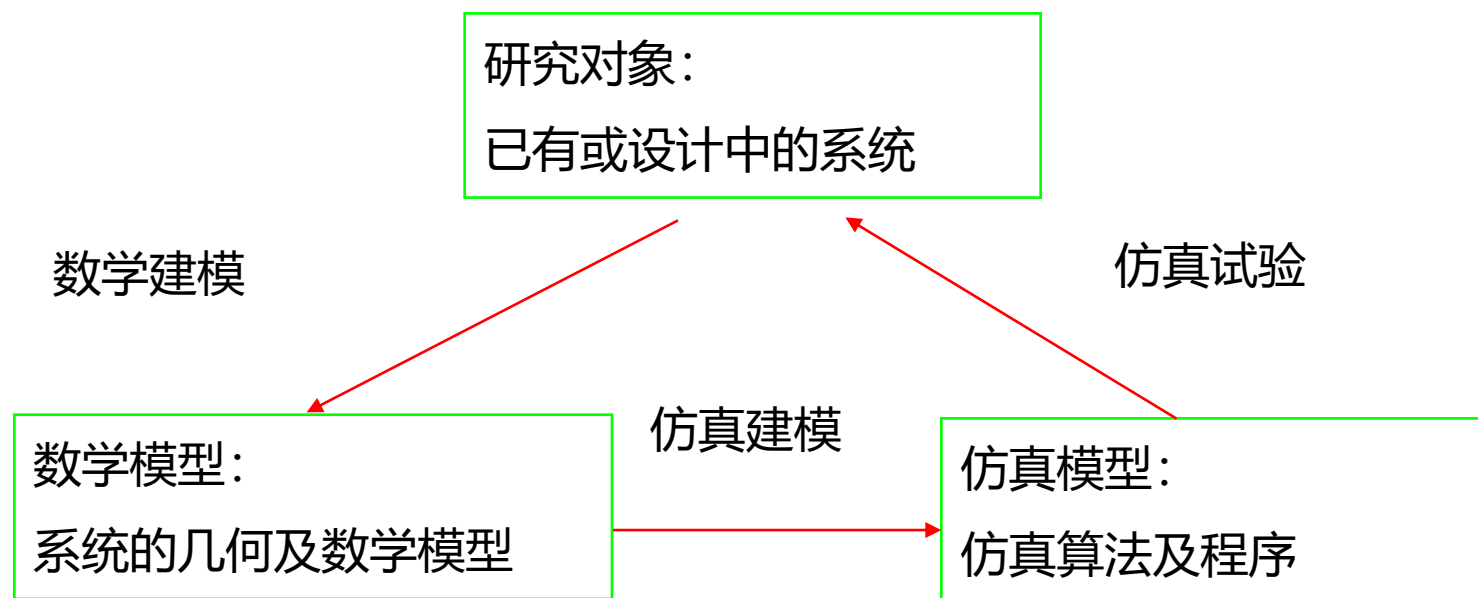
➤ 系统建模

- 数学建模：根据仿真目标建立的数学模型（相似度和精度）
 - 演绎法
 - 归纳法
- 仿真建模：采用仿真软件中的仿真算法或通过程序语言，将系统的数学模型转化为计算机能够接受的技术程序。

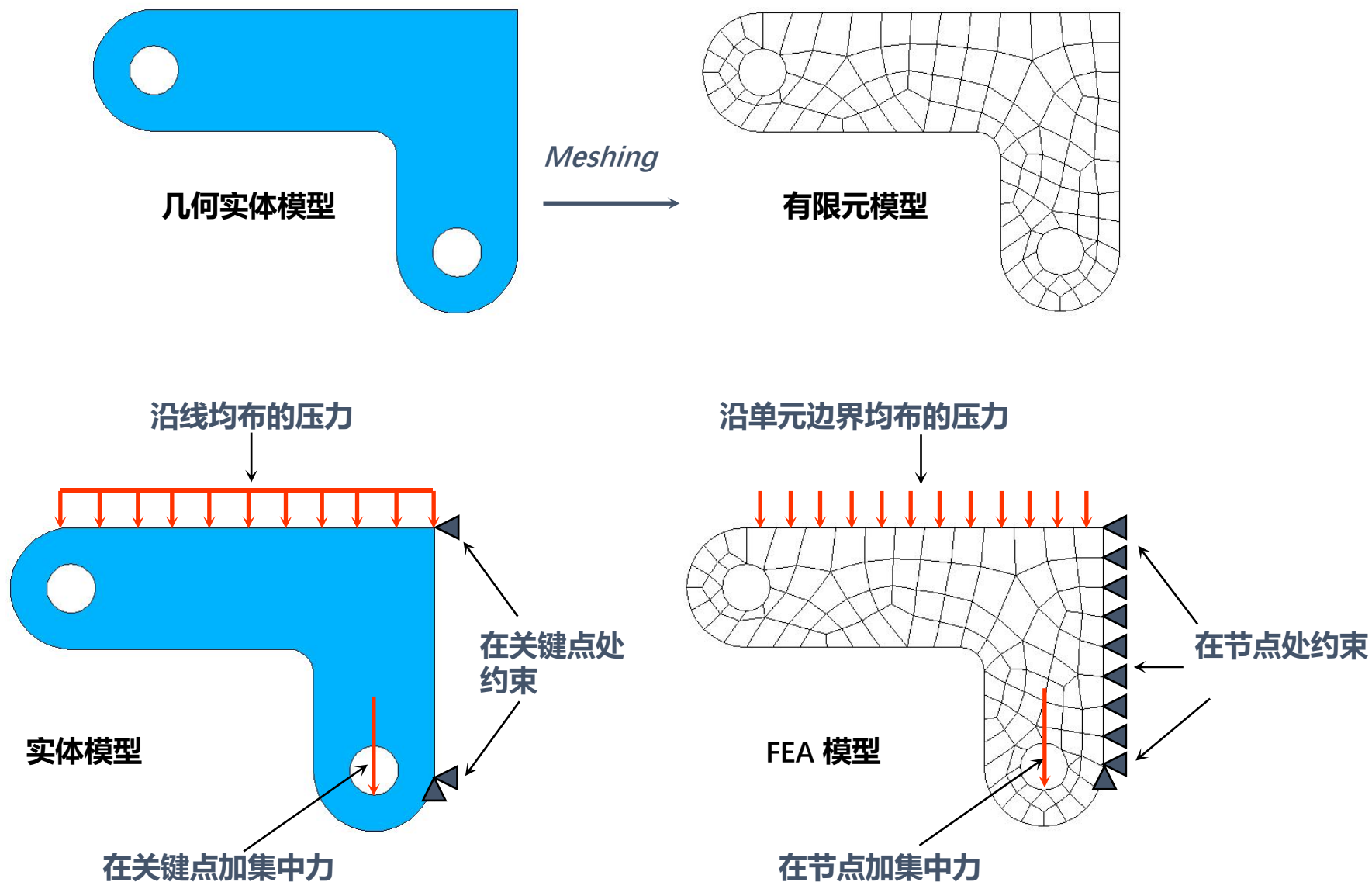
建模仿真步骤及有效方法



- 仿真试验
 - 运行仿真程序、进行仿真研究的过程，即对建立的仿真模型进行数值试验和求解的过程



建模仿真步骤及有效方法



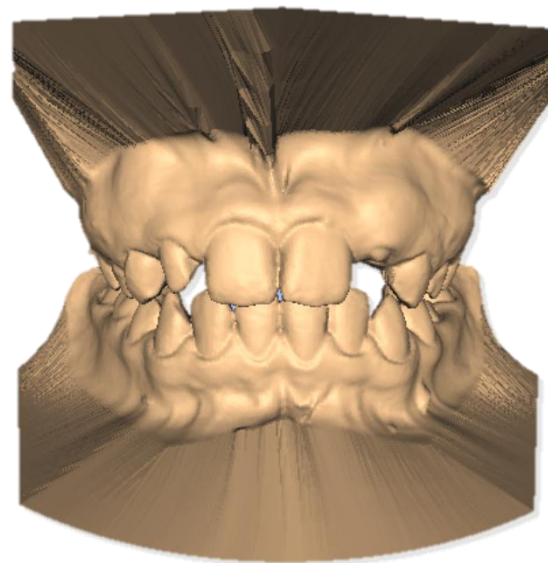
去噪/光滑化

- 输入一个带有噪声的网格，输出一个光滑的网格
- 目标是去掉高频的噪声信息

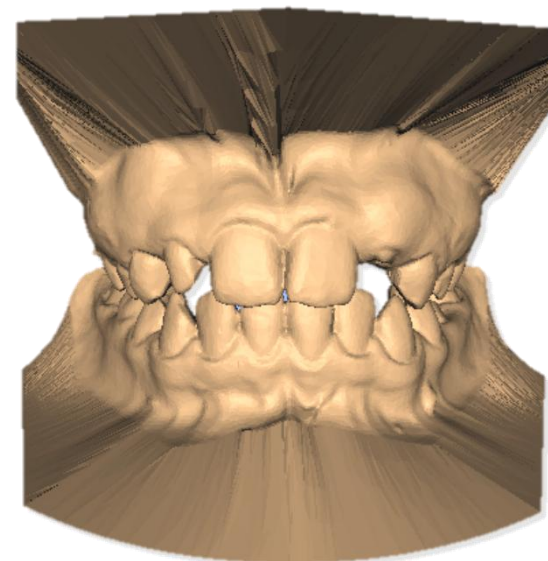


网格简化

- 网格常常包含了比需要的显示质量更多的面片
 - 一些网格生成算法的分辨率是固定的，不考虑曲面的细节
 - 网格可能会在不同的设备上使用，比如手机
- 因此，网格简化的目的是在保持视觉准确性的前提下减少面片的数量

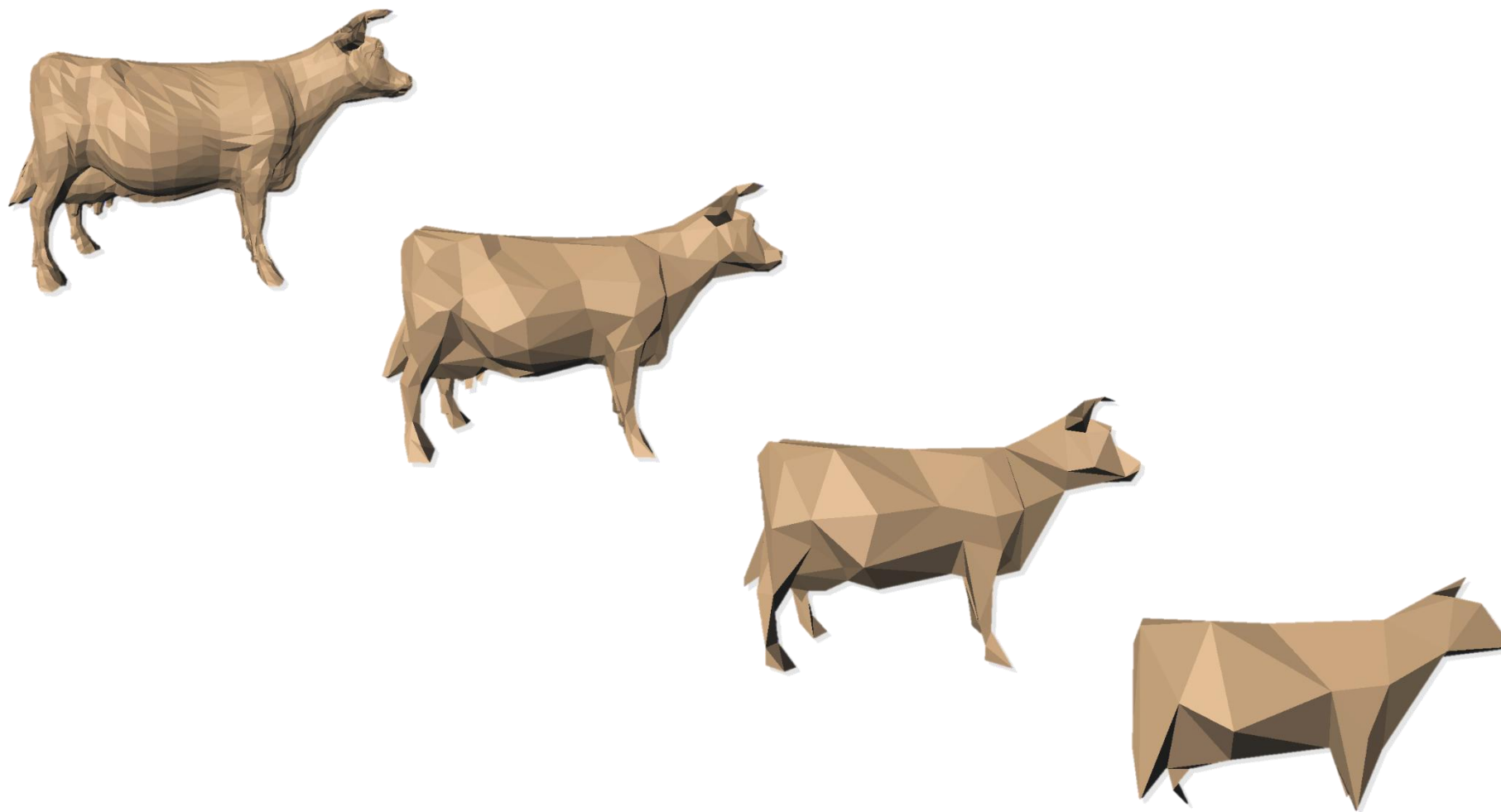


424,376 triangles

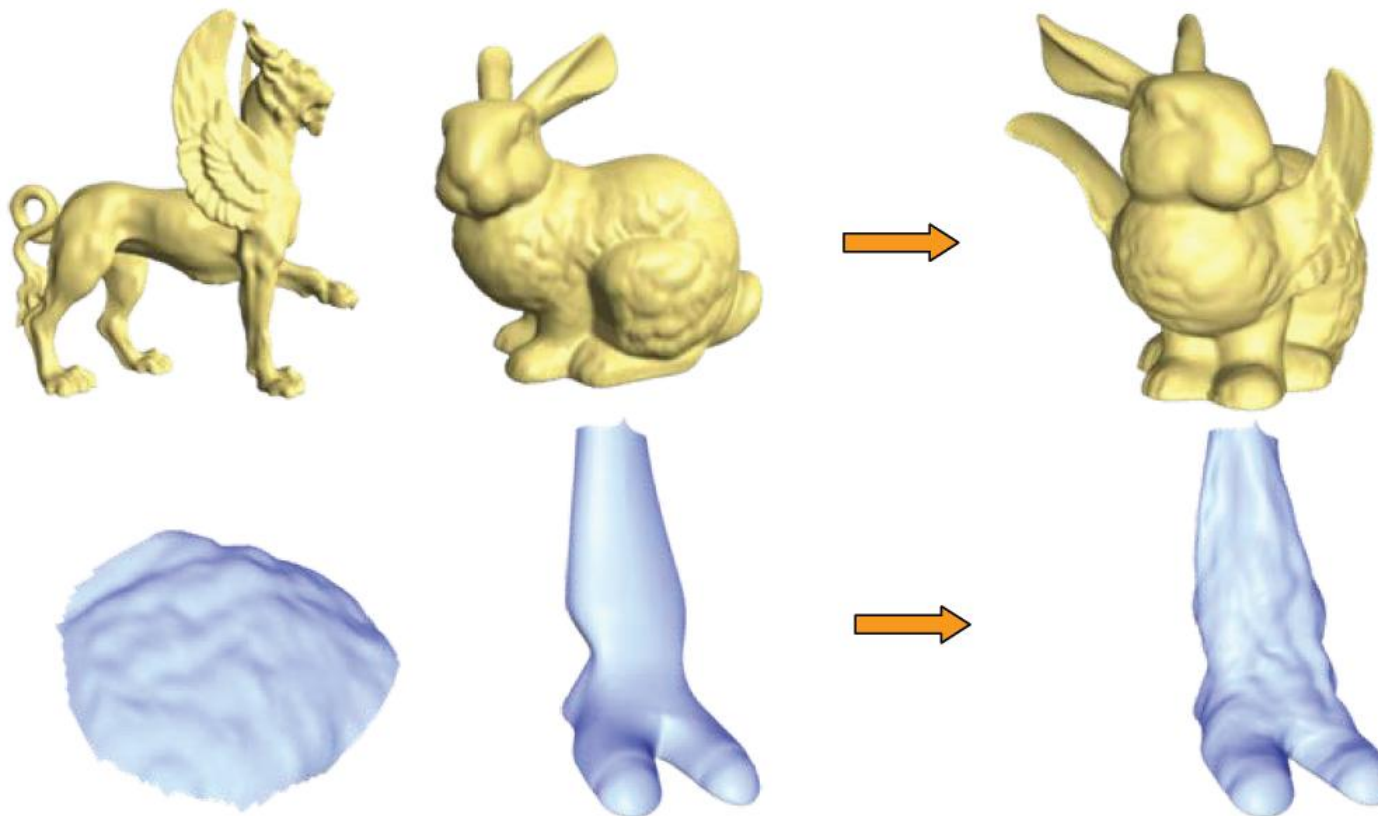


60,000 triangles

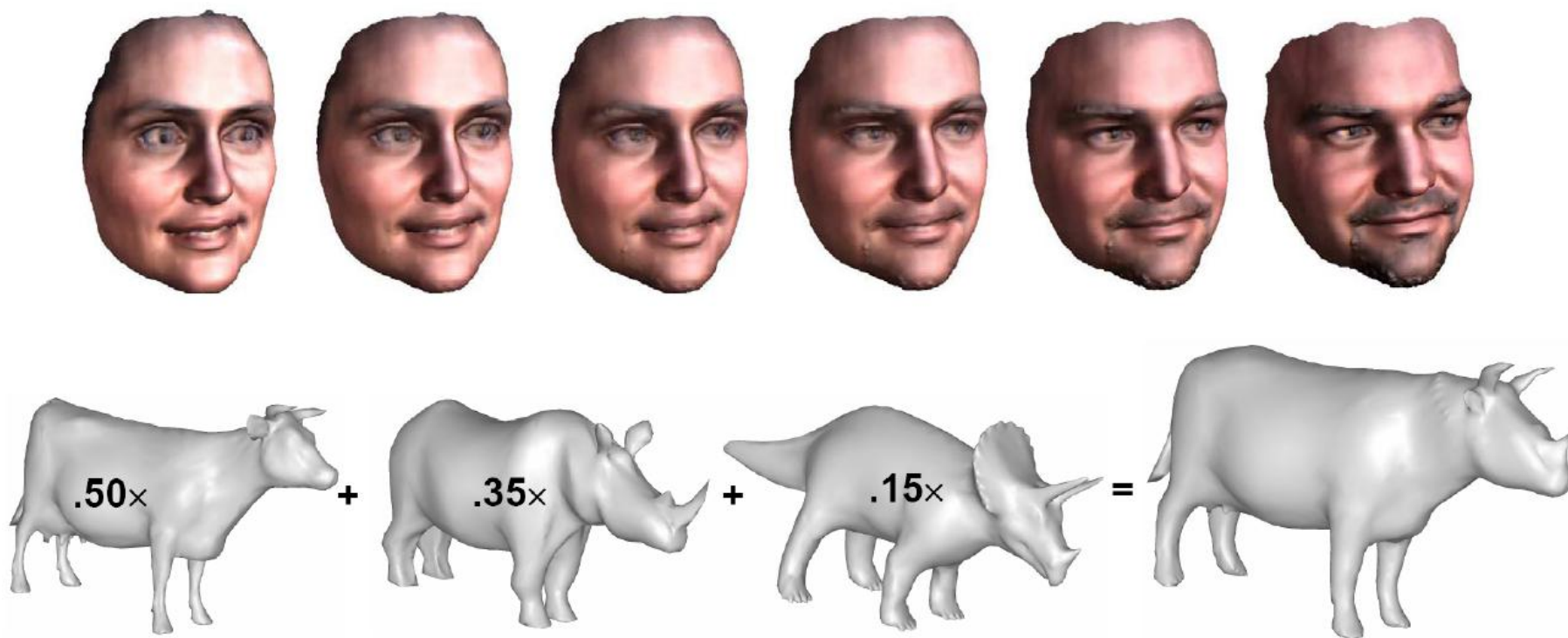
建模仿真步骤及有效方法



网格编辑

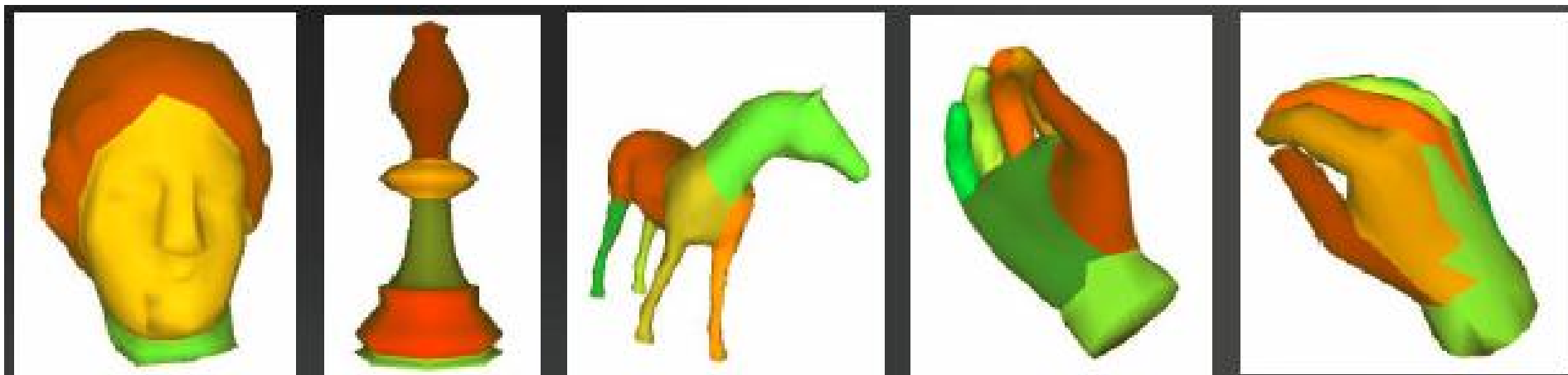


网格变形



网格分割

- 将网格分割成有意义的部分



- 仿真结果分析
 - 采用图形化技术，通过图形、图表、动画等形式显示被仿真对象的各种状态，使得仿真数据更加直观、丰富和详尽，有利于对仿真结果的分析。
 - 仿真技术中包括主观方法、抽象化、直观感受和设想，因此必须对仿真结果做全面的分析。



第一节 建模仿真步骤及有效方法

第二节 主流数字化建模软件简介

第三节 有限元理论和应用

- 前置处理
 - 构造几何模型，划分有限元网格，节点及节点编号，设置载荷、材料和边界条件等
- 有限元分析
 - 进行单元分析和整体分析，如求解位移、应力等。一般，软件提供各种有限单元库、材料库及算法库，并根据对象的物理、力学和数学特性，将问题分解成若干个子问题，由不同的有限元子系统分别完成计算。
- 后置处理
 - 对于计算结果的整体、分析、编辑和输出。

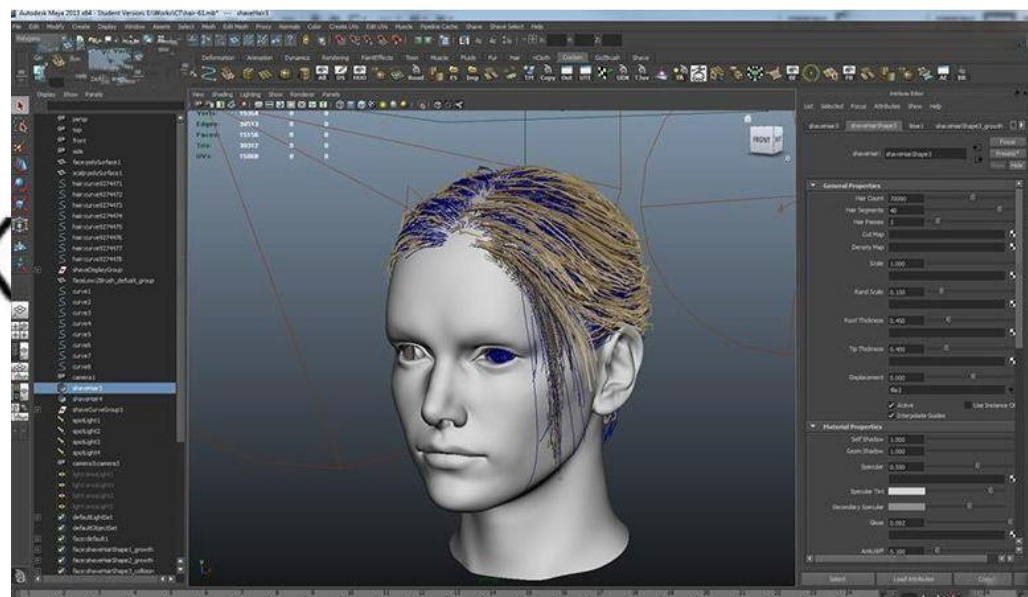
- 有限元软件的关键技术
 - 仿真分析能力
 - 单元库和材料库的丰富和完善程度。
 - 计算效率和技术精度
 - 解法库。
 - 集成性

1、3DS Max



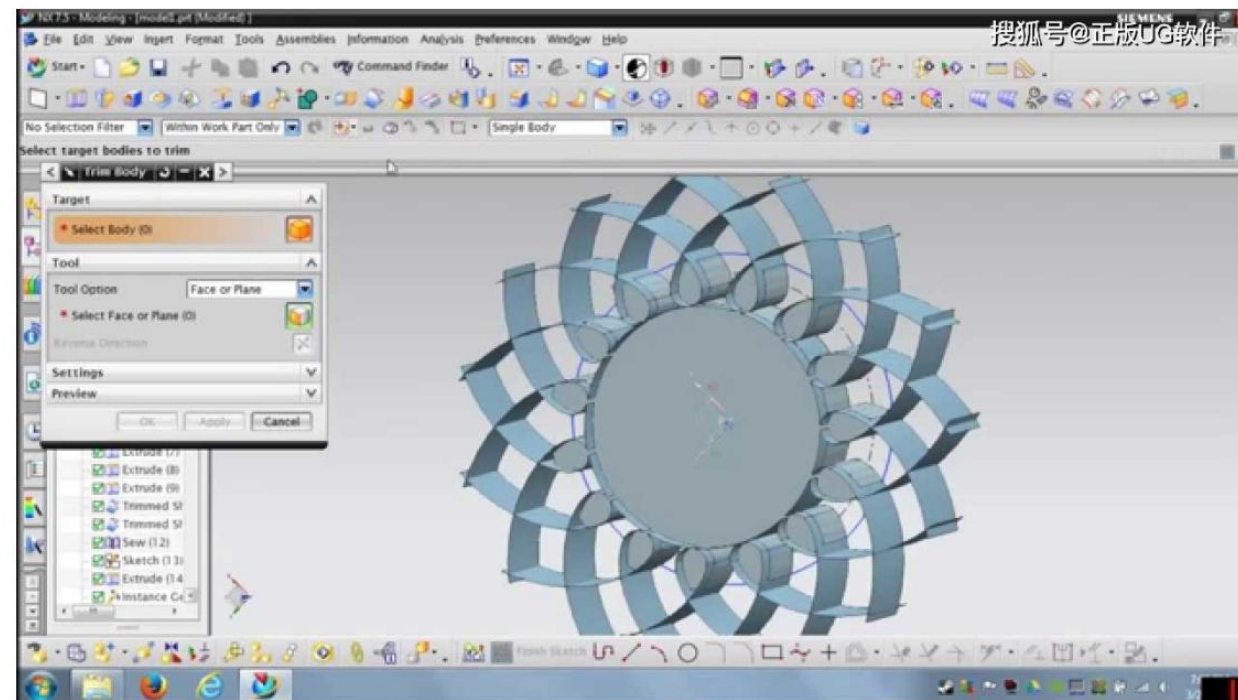
3D Studio Max, 常简称为3d Max或3ds MAX, 是Discreet公司开发的（后被Autodesk公司合并）基于PC系统的三维动画渲染和制作软件。其前身是基于DOS操作系统的3D Studio系列软件。

2、Maya



MAYA软件是Autodesk旗下的著名三维建模和动画软件。Autodesk Maya可以大大提高电影、电视、游戏等领域开发、设计、创作的工作流效率，同时改善了多边形建模，通过新的运算法则提高了性能，多线程支持可以充分利用多核心处理器的优势，新的HLSL着色工具和硬件着色API则可以大大增强新一代主机游戏的外观，另外在角色建立和动画方面也更具弹性

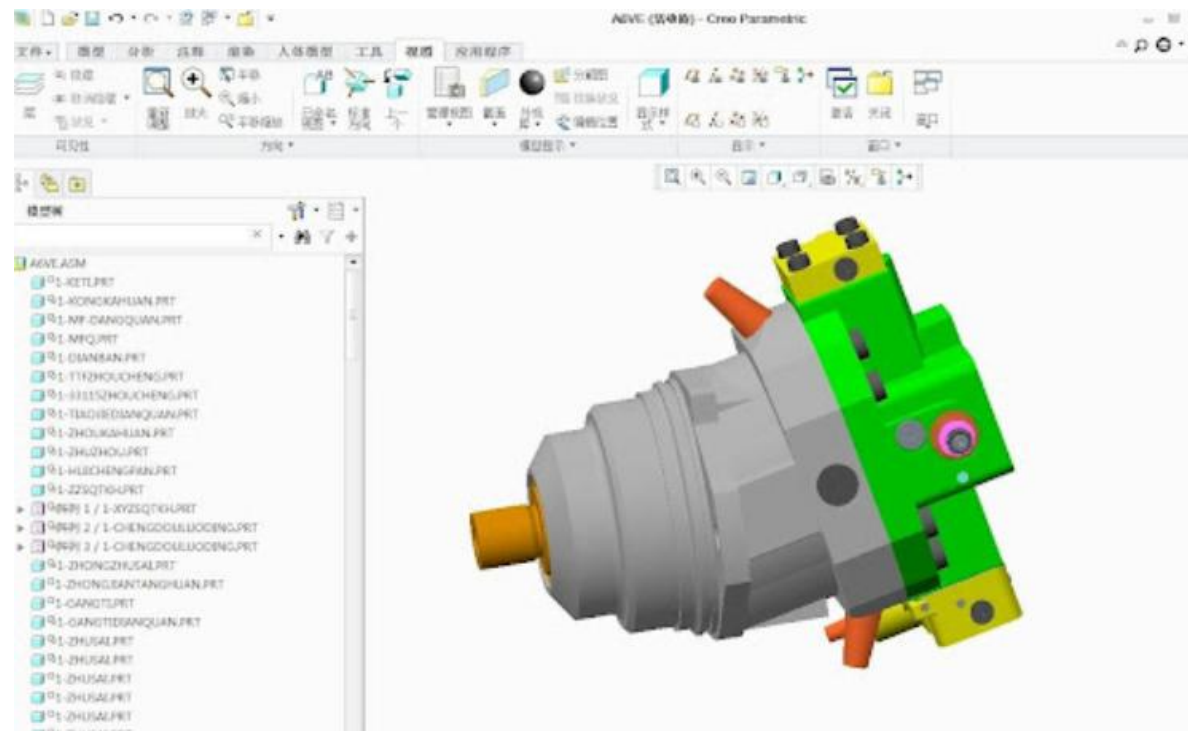
3、UG



UG NX (原名: Unigraphics) 是一个由西门子UGS PLM软件开发, 集CAD/CAE/CAM于一体的产品生命周期管理软件。UGS NX支持产品开发的整个过程, 从概念 (CAID), 到设计 (CAD), 到分析 (CAE), 到制造 (CAM) 的完整流程。

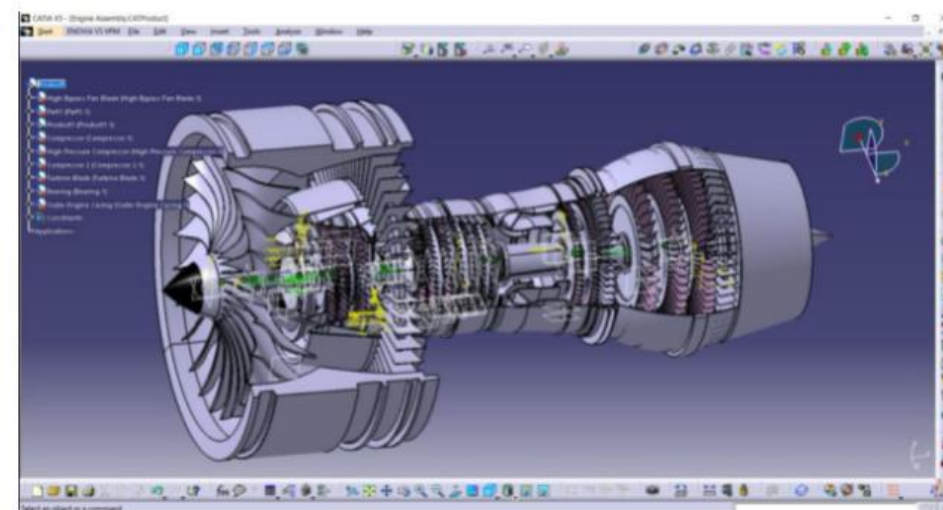
4、CREO

PTC Creo



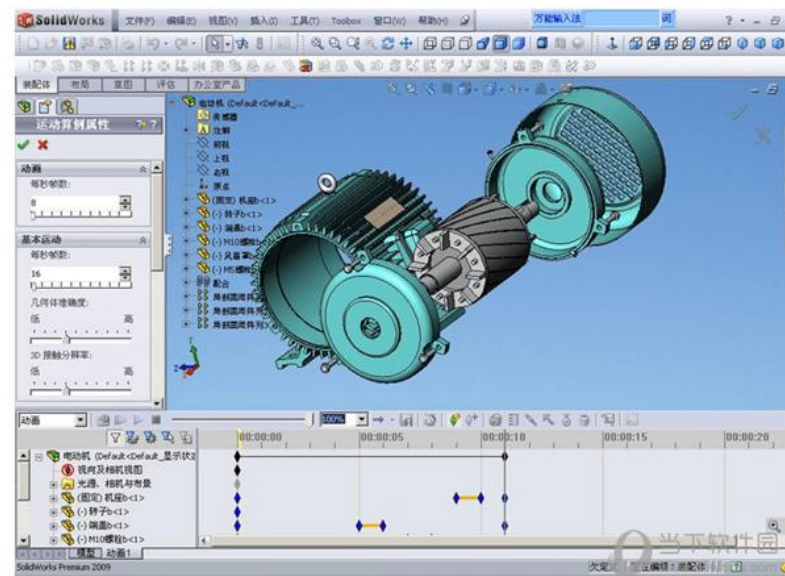
Creo (PRO/E) 是美国PTC公司于2010年10月推出CAD设计软件包。Creo是整合了PTC公司的三个软件Pro/Engineer的参数化技术、CoCreate的直接建模技术和ProductView的三维可视化技术的新型CAD设计软件包，是PTC公司闪电计划所推出的第一个产品。

4、CATIA



CATIA是由法国达索系统（Dassault Systemes S.A.）公司开发的，跨平台的商业3维CAD设计软件。CATIA作为达索系统产品生命周期管理软件平台的核心，是其最重要的软件产品。

5、Solidworks



SolidWorks是达索系统（Dassault Systemes）下的子公司，Solidworks软件功能强大，组件繁多。Solidworks有功能强大、易学易用和技术创新三大特点，这使得SolidWorks成为领先的、主流的三维CAD解决方案。SolidWorks能够提供不同的设计方案、减少设计过程中的错误以及提高产品质量。SolidWorks不仅提供如此强大的功能，而且对每个工程师和设计者来说，操作简单方便、易学易用。

支持机械产品开发的部分仿真软件

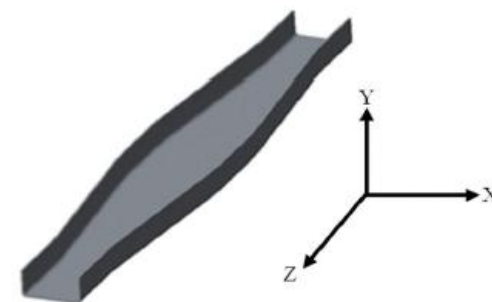
软件名称	公司名称	主要应用领域
金银花 V-CNC	广州红地技术有限公司	数控编程及加工仿真系统
PAM-STAMP、OPTRIS	法国 ESI Group	冲压成型仿真软件
PAM-CAST、PROCAST	法国 ESI Group	铸造成型仿真系统
PAM-SAFE	法国 ESI Group	汽车被动安全性仿真软件
PAM-CRASH	法国 ESI Group	碰撞、冲击仿真软件
PAM-FORM	法国 ESI Group	塑料、非金属与复合材料热成形仿真软件
SYSWELD	法国 ESI Group	热处理、焊接及焊接装配仿真软件
Flexsim	美国 Manufacturing Engineering, Inc	离散事件系统仿真软件
MATLAB	美国 MathWorks, Inc	控制系统仿真语言及系统
SIMPACK	德国 INTEC GmbH	机械系统运动学、动力学仿真系统
WITNESS	英国 Lanner Group	制造、汽车、运输、电子等仿真软件
DEFORM	美国 Scientific Forming Technologies Corp	金属锻造成型仿真软件
Moldflow	美国 Moldflow Pty Ltd	注塑模具成型仿真软件

主流数字化建模软件简介

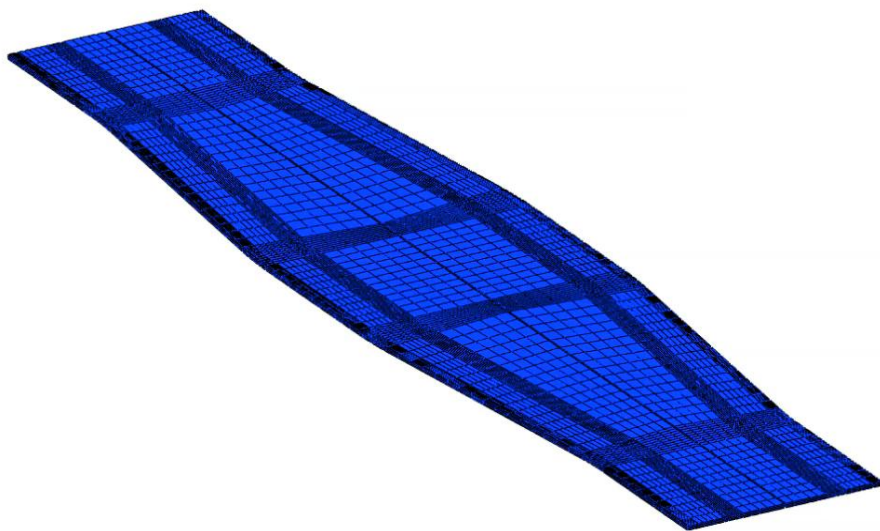
支持机械产品开发的部分仿真软件（续）

软件名称	公司名称	主要应用领域
MSC. Nastran	美国 MSC. Software Corp	结构、机械系统动力学仿真软件
MSC. ADAMS	美国 MSC. Software Corp	机构运动学、动力学仿真软件
ANSYS	美国 ANSYS, Inc	结构、热、电磁、流体、声学等仿真软件
COSMOS	美国 SolidWorks Corporation	机械结构、流体及运动仿真软件
ITI-SIM	德国 ITI GmbH	机械、液压气动、热能、电气等系统仿真软
FlowNet	美国 Engineering Design System Technology	管道流体流动仿真软件
ProModel	美国 ProModel Solution	机械系统设计、制造及物流等仿真软件
VisSim	美国 Visual Solutions Inc	控制、通讯、运输、动力等系统仿真软件
WorkingModel VisualNastran	美国 MSC. Software Corp	机构运动学、动力学仿真软件
Simul8	美国 Simul8 Corp	物流、资源及商务决策仿真软件
HSCAE、HSC-FLOW	华中科技大学	注塑模具仿真分析软件
Z-MOLD	郑州工业大学	塑料模具仿真分析软件
COPRA	德国 data M Software GmbH	辊压成型仿真软件

ABAQUS CAE仿真示例：变截面汽车零件辊冲成形



Step: Forming Frame: 0
Total Time: 0.000000





第一节 建模仿真步骤及有效方法

第二节 主流数字化建模软件简介

第三节 有限元理论和应用

- 将连续体看成是有限个部分（有限元）的集合体，其性态由有限个参数所规定，在求解离散有限元的集合体时，其有限单元应满足连续体所遵循的规则。
- 有限元法是将连续体的结构模型分解成数目有限的小单元（有限元）。有限元彼此之间通过有限个结点互相联结，在各结点上引入等效力代替作用在单元上的外力，通过计算这些单元阵点力和位移之间的关系来解决连续体的力学问题。
- 有限元法的实质是将无限个自由度的连续体理想化为只有有限个自由度的单元集合体，使复杂问题简化为适合于数值解法的结构型问题。

- 基本概念

- 有限元 (Finite Element Method, FEM)是一种基于计算机的数值仿真技术。
- 基本思想:
 - 将形状复杂的连续体离散化为有限个单元组成的有效组合体, 单元之间通过有限个结点相互连接;
 - 根据精度要求, 用有限个参数来描述单元的力学或其他特性, 连续体的特性就是全部单元体特性的叠加;
 - 根据单元之间的协调条件, 建立方程组, 联立求解就可以得到所求的参数特征。

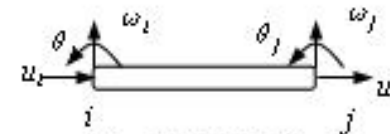
- 基本方法

- 位移法：以应力计算为例，位移法是以节点位移为基本未知量，选择适当的位移函数，进行单元的力学特性分析，在节点处建立单元的平衡方程，即单元刚度方程，有单元刚度方程组成整体刚度方程，求解节点位移，再由节点位移求解应力
- 力法：以节点力为基本未知量，在节点上建立位移连续方程，在解出节点力后，再加上节点位移和应力。

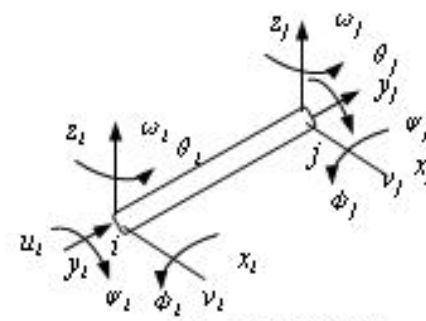
- 结构离散
 - 结构离散即将求解区域分割成具有某种几何形状的单位。
 - 结构离散化处理中需要解决的主要问题是：单元类型选择、单元划分、单元编号和节点编号。
 - 单元类型选择的原则
 - 所选单元类型应对结构的几何形状有良好的逼近程度。
 - 要真实地反映分析对象的工作状态。例如机床基础大件在受力时，弯曲变形很小，可以忽略，这时宜采用平面应力单元。
 - 根据计算精度的要求，并考虑计算工作量的大小，恰当选用线性或高次单元。



(a) 杆单元



(b) 平面梁单元



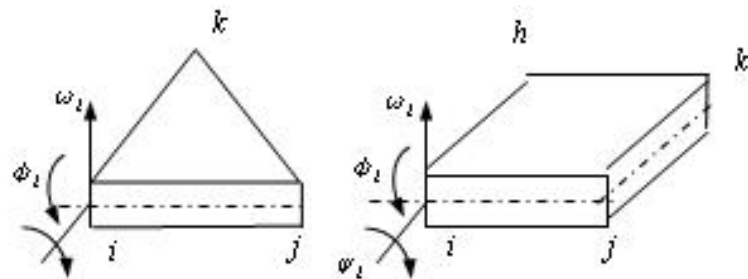
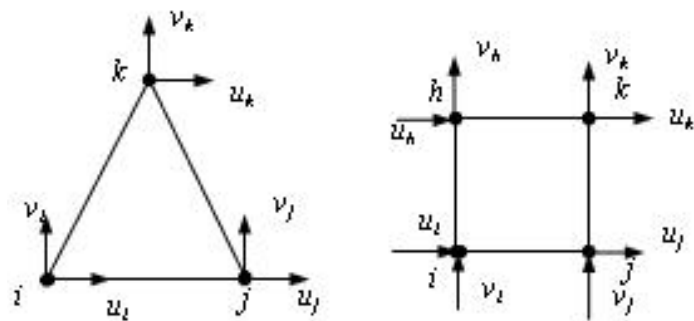
(c) 空间梁单元

• 杆状单元

- 一般把截面尺寸远小于其轴向尺寸的构件称为杆状构件。杆状构件通常用杆状单元来描述。杆状单元属于一维单元。根据结构形式和受力情况，杆状单元模拟杆状构件时，一般还应分为杆单元和梁单元两种形式。
- 平面梁单元也只有两个节点，每个节点在图示平面内具有三个自由度，即横向自由度、轴向自由度和转动自由度。该单元可以承受弯矩切向力和轴向力，如机床的主轴、导轨可用这种单元模拟。
- 空间梁单元实际是平面梁单元向空间的推广。因而单元的每个节点具有六个自由度。当梁截面的高度大于1/5长度时，一般要考虑剪切应变对挠度的影响，通常的方法是对梁单元的刚度矩阵进行修正。

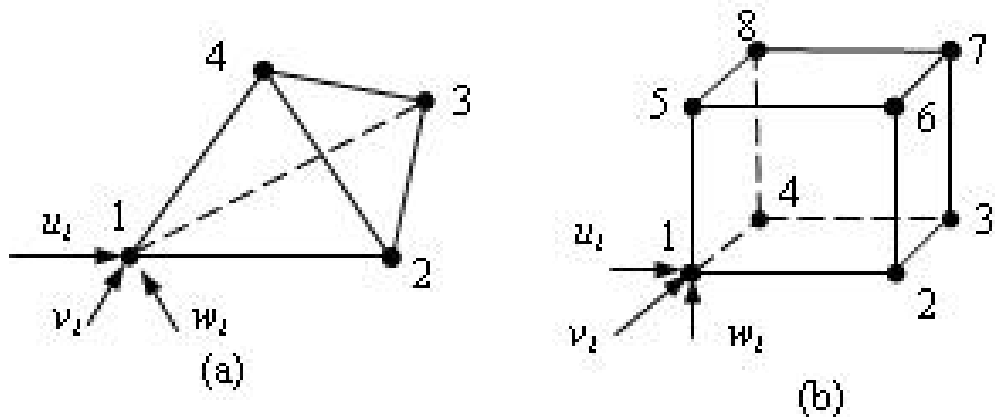
(2) 薄板单元:

- 薄板构件一般是指厚度远小于其轮廓尺寸的构件。薄板单元主要用于薄板构件的处理，但对那些可以简化为平面问题的受载结构，也可使用这类单元。这类单元属于二维单元，按其承载能力又可分为平面单元、弯曲单元和薄壳单元三种。
- 常用的平面单元有三角形单元和矩形单元两种，它们分别有三个和四个节点，每个节点有两个面内平动自由度。这类单元不能承受弯曲载荷。
- 薄板弯曲单元主要承受横向载荷和绕两个水平轴的弯矩，它也有三角形和矩形两种单元形式，分别具有三个和四个节点，每个节点都有一个横向自由度和两个转动自由度，
- 所谓薄壳单元，实际上是平面单元和薄板弯曲单元的组合，它的每个节点既可承受面内的作用力，又可承受横向载荷和绕水平轴的弯矩。显然，采用薄板单元来模拟工程中的板壳结构，不仅考虑了板在水平面内的承载能力，而且考虑了板的抗弯能力，这是比较接近实际情况的。



- 多面体单元

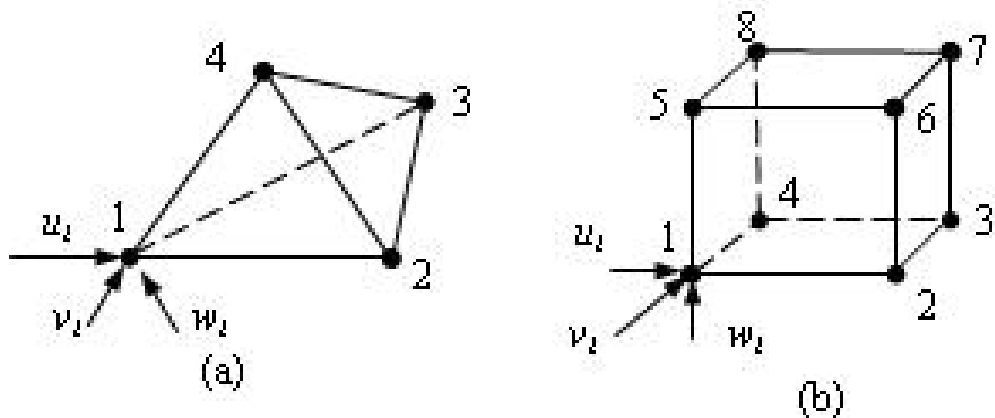
- 多面体单元是平面单元向空间的推广。图所示的多面体单元属于三维单元（四面体单元和长方体单元），分别有4个和8个节点，每个节点有三个沿坐标轴方向的自由度。多面体单元可用于对三维实体结构的有限元分析。目前大型有限元分析软件中，多面体单元一般都被8~21节点空间等参单元所取代。



多面体单元

- 多面体单元

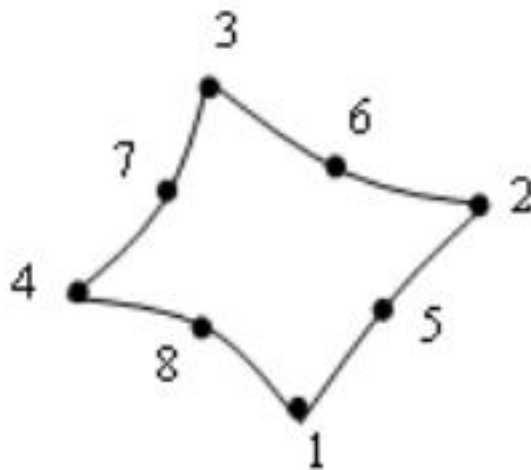
- 多面体单元是平面单元向空间的推广。图所示的多面体单元属于三维单元（四面体单元和长方体单元），分别有4个和8个节点，每个节点有三个沿坐标轴方向的自由度。多面体单元可用于对三维实体结构的有限元分析。目前大型有限元分析软件中，多面体单元一般都被8~21节点空间等参单元所取代。



多面体单元

- 等参单元

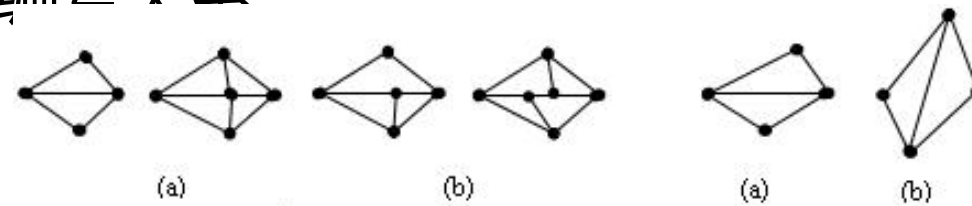
- 在有限元法中，单元内任意一点的位移是用节点位移进行插值求得的，其位移插值函数一般称为形函数。如果单元内任一点的坐标值也用同一形函数，按节点坐标进行插值来描述，那么这种单元就称为等参单元。
- 等参单元有许多优点，它可用于模拟任意曲线或曲面边界，其分析计算的精度较高。等参单元的类型很多，常见的有平面4~8节点等参单元和8~21节点空间等参单元。



等参单元

• 离散化具体做法:

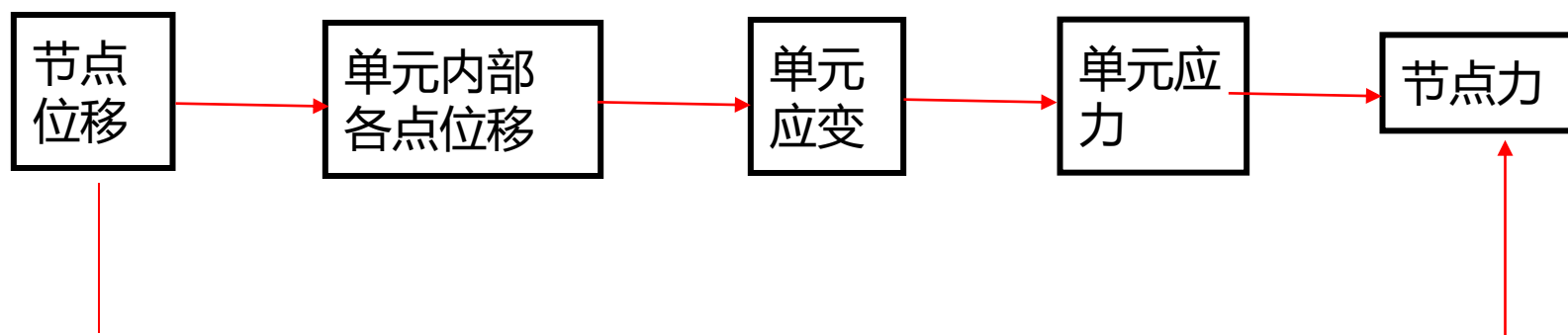
- 给每个节点、节点编号, 建立单元与节点的编号关系
- 建立整体坐标系并计算各节点的坐标值
- 准备好单元几何和材料特性数据



• 在进行离散化处理时应注意下述问题:

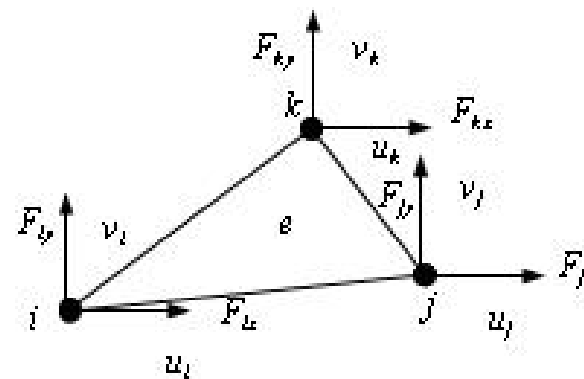
- 任意一个单元的顶点必须同时是相邻单元的顶点, 而不能是相邻单元的内点。
- 尽可能使单元的各边长度相差不要太大。在三角形单元中最好不要出现钝角。
- 在结构的不同部位应采用不同大小的单元来划分。重要部位网格密、单元小, 次要部位网格稀疏、单元大。
- 对具有不同厚度或由几种材料组合而成的构件, 必须把厚度突变线或不同材料的交界线取为单元的分界线。即同一单元只能包含一个厚度或一种材料常数。
- 如果构件受集中载荷作用或承受有突变的分布载荷作用, 应当把受集中载荷作用的部位或承受有突变的分布载荷作用的部位划分得更细, 并且在集中载荷作用点或载荷突变处设置节点。
- 若结构和载荷都是对称的, 则可只取一部分来分析, 以减小计算量。

- 单元分析的主要内容：由节点位移求内部任一点的位置，由节点位移求单元应变、应力和节点力。
- 单元分析的主要任务是建立单元刚度方程，即求出单元节点位移和节点力之间的转换关系，从而求出单元刚度矩阵。



- 对任意的三角形单元，设节点编号为 l, m, n ，描述单元内任一点 (x, y) 的位移，记为 $u(x, y), v(x, y)$ ，可先把 u, v 假设为坐标 x, y 的某种函数，也就是选用适当的位移模式。该三角形节点有三个节点，共6个自由度，即6个位移分量，用阵列 $(q)^{(e)} = (u_l \ v_l \ u_m \ v_m \ u_n \ v_n)^T$ 表示单元节点位移列阵。
- 假设单元内的位移 u, v 是 x, y 的线性函数，表示为：

$$\begin{cases} u = a_1 + a_2 x + a_3 y \\ v = a_4 + a_5 x + a_6 y \end{cases}$$



单元的节点力和位移

- 其中三角形单元的面积

$$\Delta = \frac{1}{2}(x_l y_m + x_m y_n + x_n y_l) - \frac{1}{2}(x_m y_l + x_n y_m + x_l y_n)$$

$$a_l = \begin{vmatrix} x_m & y_m \\ x_n & y_n \end{vmatrix} \quad b_l = -\begin{vmatrix} 1 & y_m \\ 1 & y_n \end{vmatrix} \quad c_l = \begin{vmatrix} 1 & x_m \\ 1 & x_n \end{vmatrix}$$

$$a_m = \begin{vmatrix} x_l & y_l \\ x_n & y_n \end{vmatrix} \quad b_m = \begin{vmatrix} 1 & y_l \\ 1 & y_n \end{vmatrix} \quad c_m = -\begin{vmatrix} 1 & x_l \\ 1 & x_n \end{vmatrix}$$

$$a_n = \begin{vmatrix} x_l & y_l \\ x_m & y_m \end{vmatrix} \quad b_n = -\begin{vmatrix} 1 & y_l \\ 1 & y_m \end{vmatrix} \quad c_n = \begin{vmatrix} 1 & x_l \\ 1 & x_m \end{vmatrix}$$

- 写成矩阵形式

$$\begin{Bmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x & y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x & y \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{Bmatrix}$$

- 简记为:

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = [M] \{a\}$$

- 将 l, m, n 的节点坐标分别代入，得到6个方程。

$$\begin{Bmatrix} u_l \\ v_l \\ u_m \\ v_m \\ u_n \\ v_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_l & y_l & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_l & y_l \\ 1 & x_m & y_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_m & y_m \\ 1 & x_n & y_n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_n & y_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{Bmatrix}$$

- 简记为

$$\{q\}^e = [A]\{a\} \quad \{a\} = [A]^{-1}\{q\}^e$$

- 代人

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = [M][A]^{-1} \{q\}^e$$

- 或写为

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = [N][\delta]^e$$

- 式中, $[N]$ 称为单元位移的形状函数矩阵

- 得出

$$[N] = \begin{bmatrix} N_l & 0 & N_m & 0 & N_n & 0 \\ 0 & N_l & 0 & N_m & 0 & N_n \end{bmatrix}$$

- 其中，各形状函数为：

$$\begin{cases} N_l = \frac{a_l + b_l + c_l}{2\Delta} \\ N_m = \frac{a_m + b_m + c_m}{2\Delta} \\ N_n = \frac{a_n + b_n + c_n}{2\Delta} \end{cases}$$

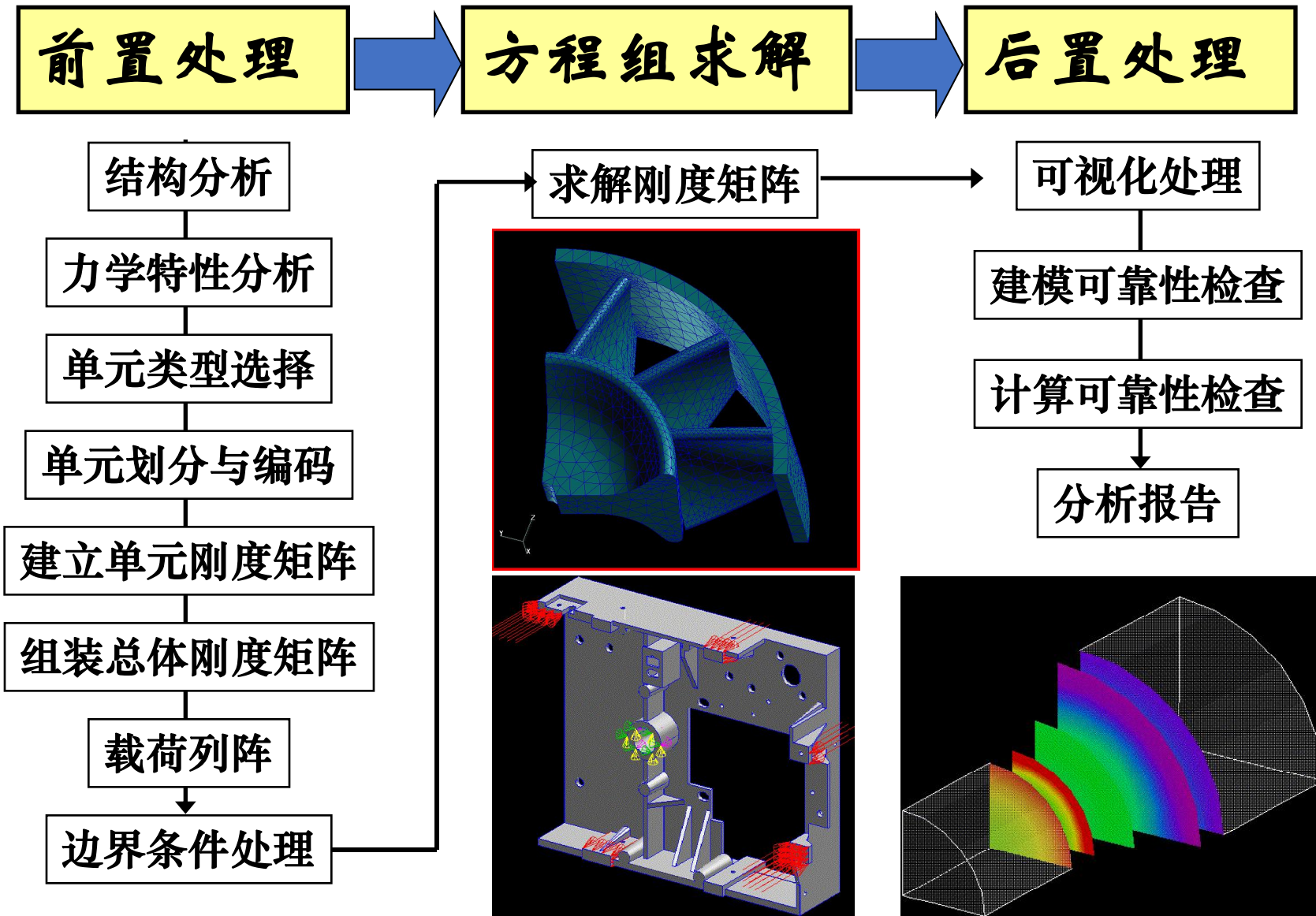
- 当结构受载荷达到静止的变形位置时，各单元中单元节点力的作用下产生的应力，处于平衡状态。根据虚功原理，当结构受载荷作用处于平衡状态时，在任意给出的节点虚位移下，外力 F 及内力 σ 所做的虚功之和等于零，即

$$\delta W F + \delta W \sigma = 0$$

$$\{f\}^e = [k]^e \{q\}^e$$

- 单元刚度矩阵的每一元素与单元的几何形状和材料特性有关，表示由单位节点位移所引起的节点力分量。单元刚度矩阵具有三个性质：①对称性。单元刚度矩阵是一个对称阵。②奇异性。单元刚度矩阵各行（列）的各元素之和为零，因为在无约束条件下单元可作刚体运动。③单元刚度矩阵主对角线上的元素为正值，因为位移方向与力作用方向一致。

有限元建模流程



有限元分析的前置处理

目的：生成包含结点、单元类型、材料、边界条件、载荷等内容的网格。

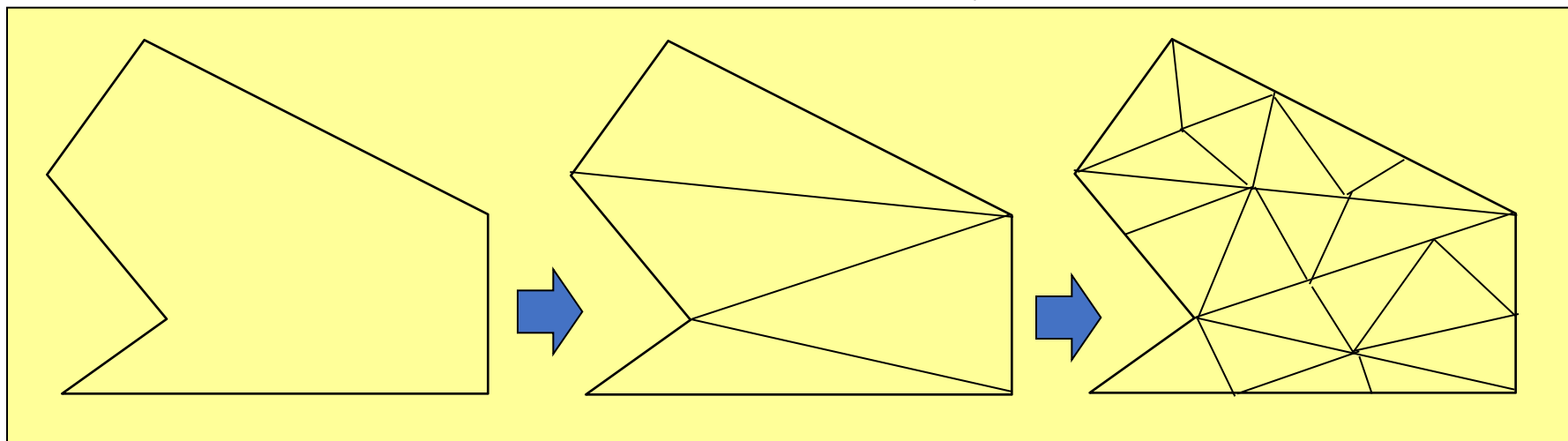
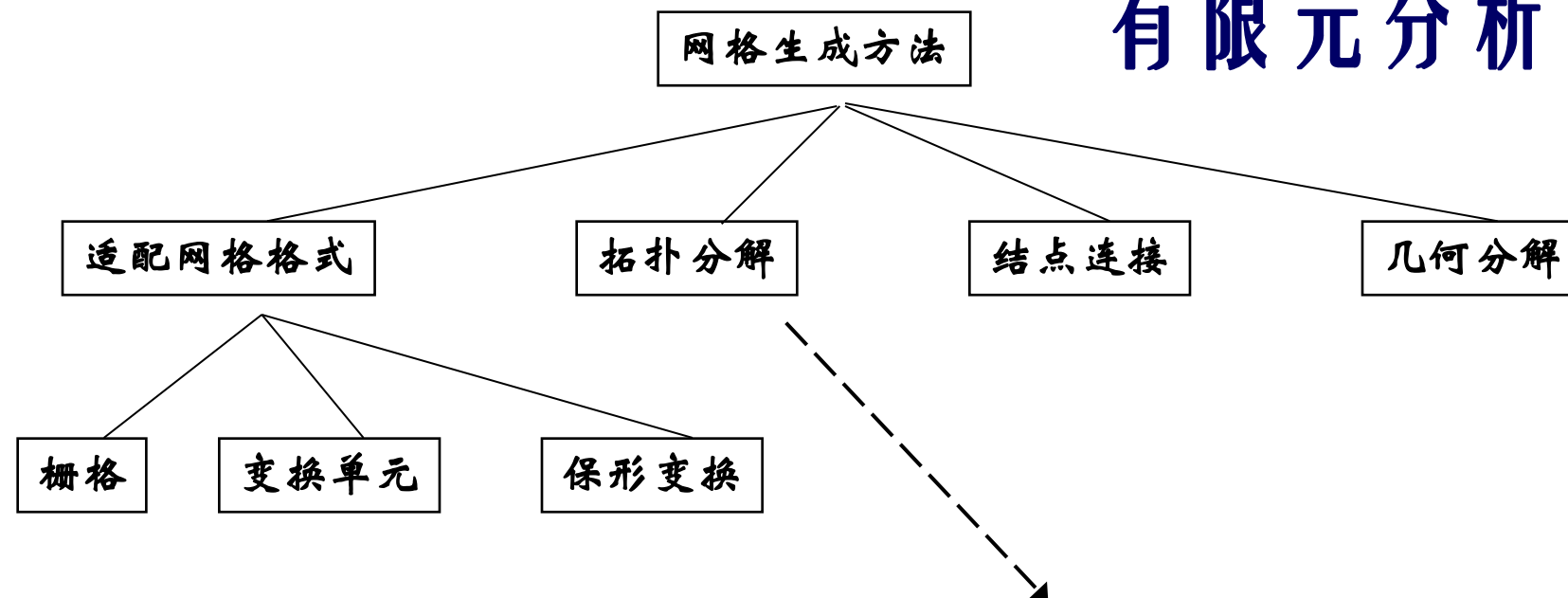
方式：(1) 人机交互的FEM网格建模；
(2) CAD系统中的自动或半自动网格生成

单元类型：一维的杆单元；二维的梁单元和板单元（三角形和四边形）；三维的**多面体单元**（四面体和六面体）。

$$\sigma = E\varepsilon \quad \varepsilon = \frac{\delta}{L} \quad \delta = \frac{PL}{EA}$$

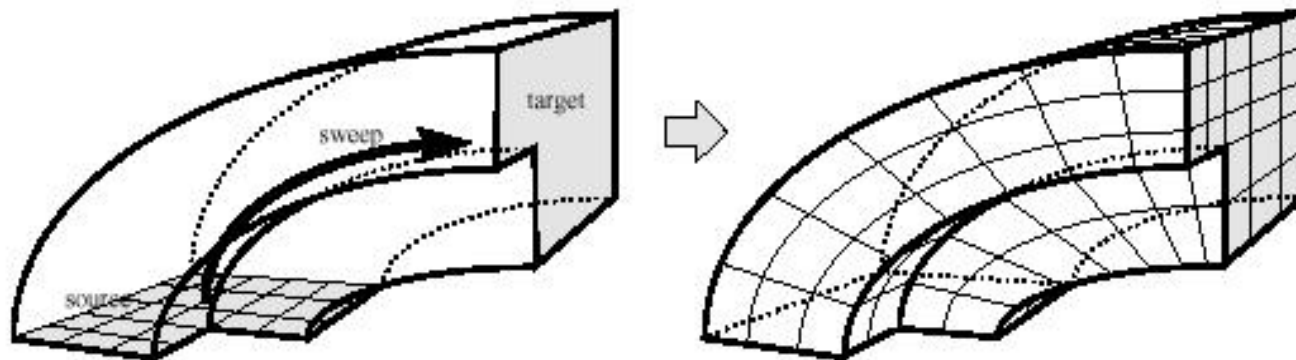
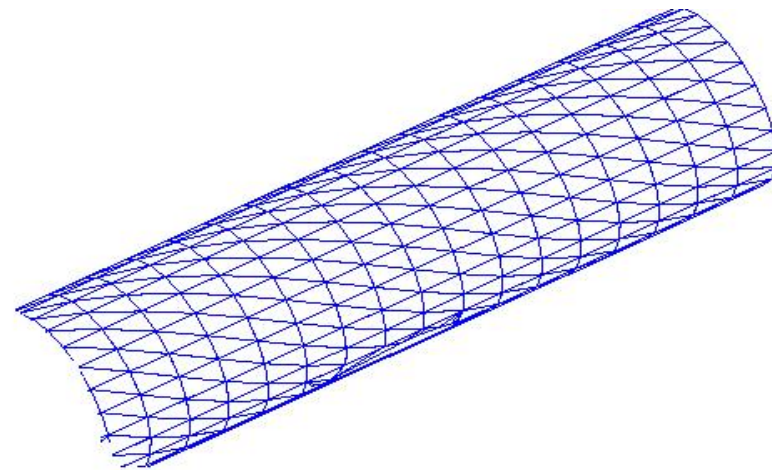
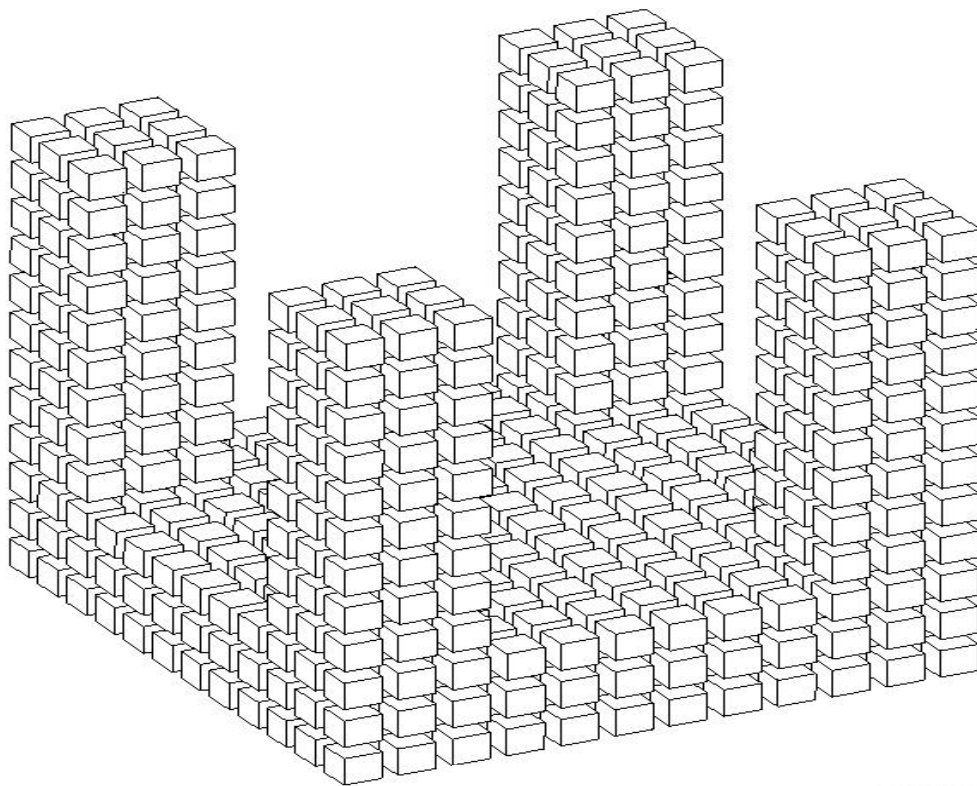


有限元分析的前置处理



有限元分析的前置处理

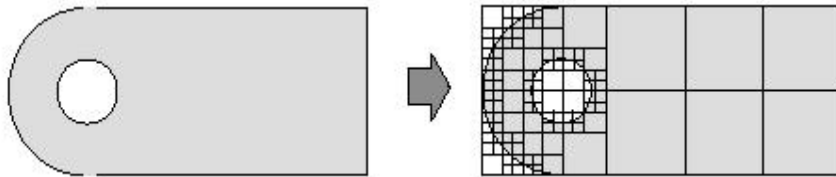
结构化网格生成方法



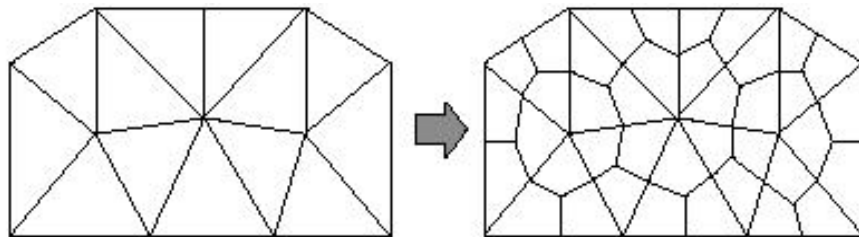
有限元分析的前置处理

非结构化网格生成方法

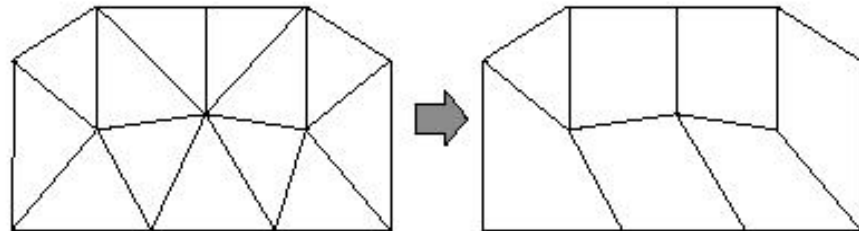
四叉树法



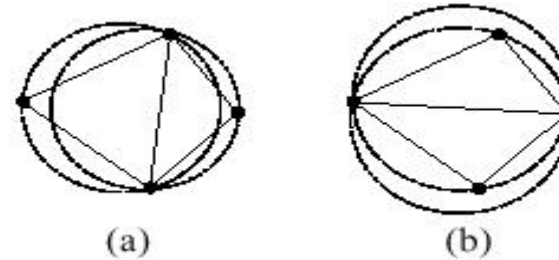
间接法



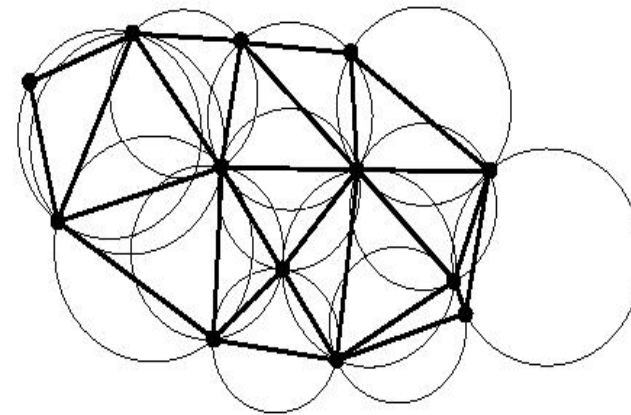
Quad mesh generated by splitting each triangle into three quads



Quad-dominant mesh generated by combining triangles.



Delaunay网格

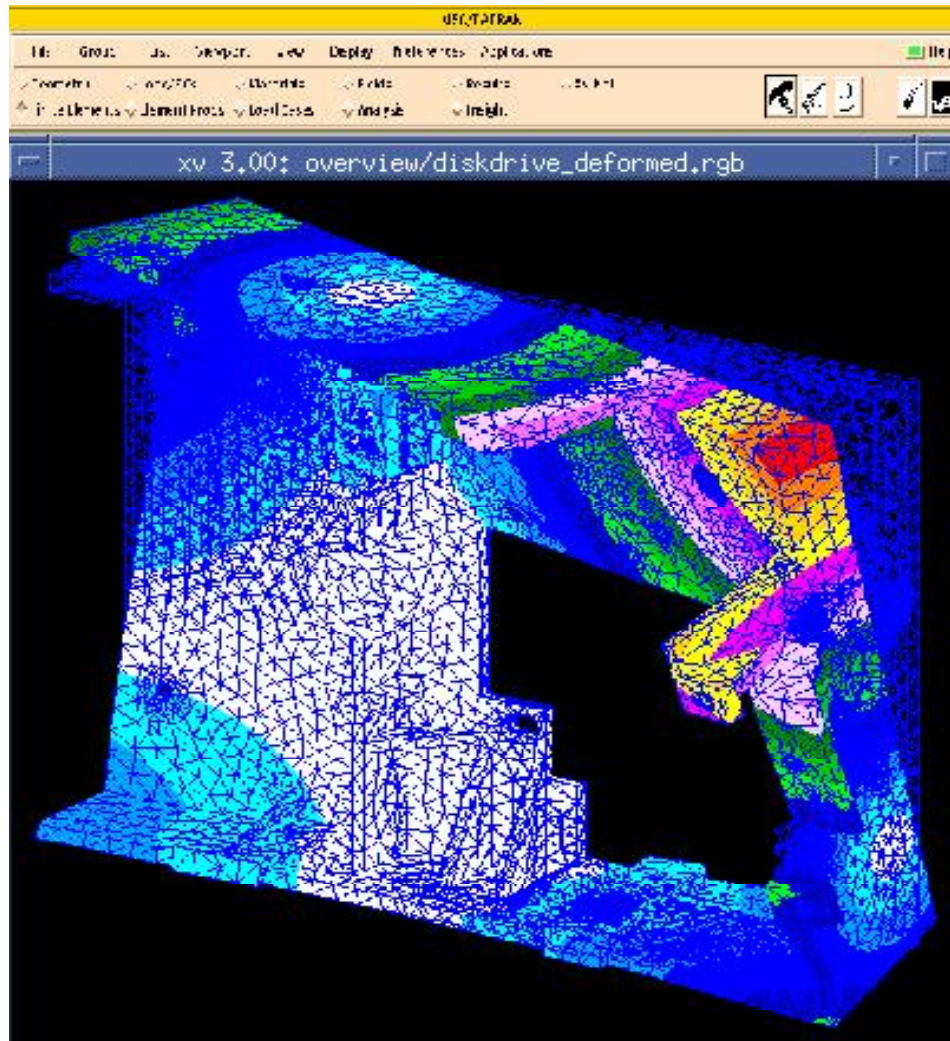


Every triangle of a Delaunay triangulation has an empty circumcircle.

有限元分析的后置处理

- 计算结果可视化
- 计算可靠性检查

- 变形图
- 等值线图
- 应力应变彩色图
- 应力应变曲线
- 振型图





谢谢聆听

Thank You