

声明：© 2021, COMSOL Co. Ltd. 本课程包含的所有内容版权为 COMSOL® 公司所有。课程内容仅供参加本课程的用户学习使用，严禁个人或组织擅自以任何形式盗录、翻拍及转载。所有未经 COMSOL 公司授权而使用本课程内容的行为均视为侵权行为，COMSOL 公司将保留追究其法律责任的权利。

# COMSOL 多物理场仿真基础强化培训

## 课程 2：几何建模、草图和 CAD 导入

施 翀

应用工程师

COMSOL 中国

# 日程安排

- 基本操作示例
- 几何建模、草图和 CAD 导入
- 网格剖分
- 结果后处理和常用函数

# 几何建模

- 在 COMSOL® 中绘制
  - 完全在 COMSOL 中绘制，不需要其他任何软件 (+)
  - 与 CAD 软件相比，可能会较慢 (-)
- 使用 LiveLink™ 模块
  - 直接与现有的 CAD 软件一起工作，不需要花时间学习新功能 (+)
  - 可以在 CAD 软件中使用参数化建模 (+)
  - CAD 模型有可能并不是进行分析的理想结构 (-)
- 导入 CAD 数据
  - CAD 经常需要修复和削除，适应分析建模/网格剖分 (-)
  - 不方便参数化和修改 (-)
- 导入 Mesh 数据
  - 不可能进行修改 (-)

# 几何内核

- 用于处理几何：
  - 跟踪对象的数学表示
  - 具有构造对象及其相互作用的功能
  - 保证几何的关联性 (修改后原先设置有效)
- COMSOL 内核：
  - 对 COMSOL 中创建的几何效果最好
  - 包含在 COMSOL Multiphysics® 中
- CAD 导入模块内核
  - Parasolid® 内核
  - 对于导入的 CAD 对象效果最好，增加额外的几何操作功能
  - 包含在 CAD 导入模块，设计模块和其他 CAD 产品对应的 LiveLink™ 接口模块



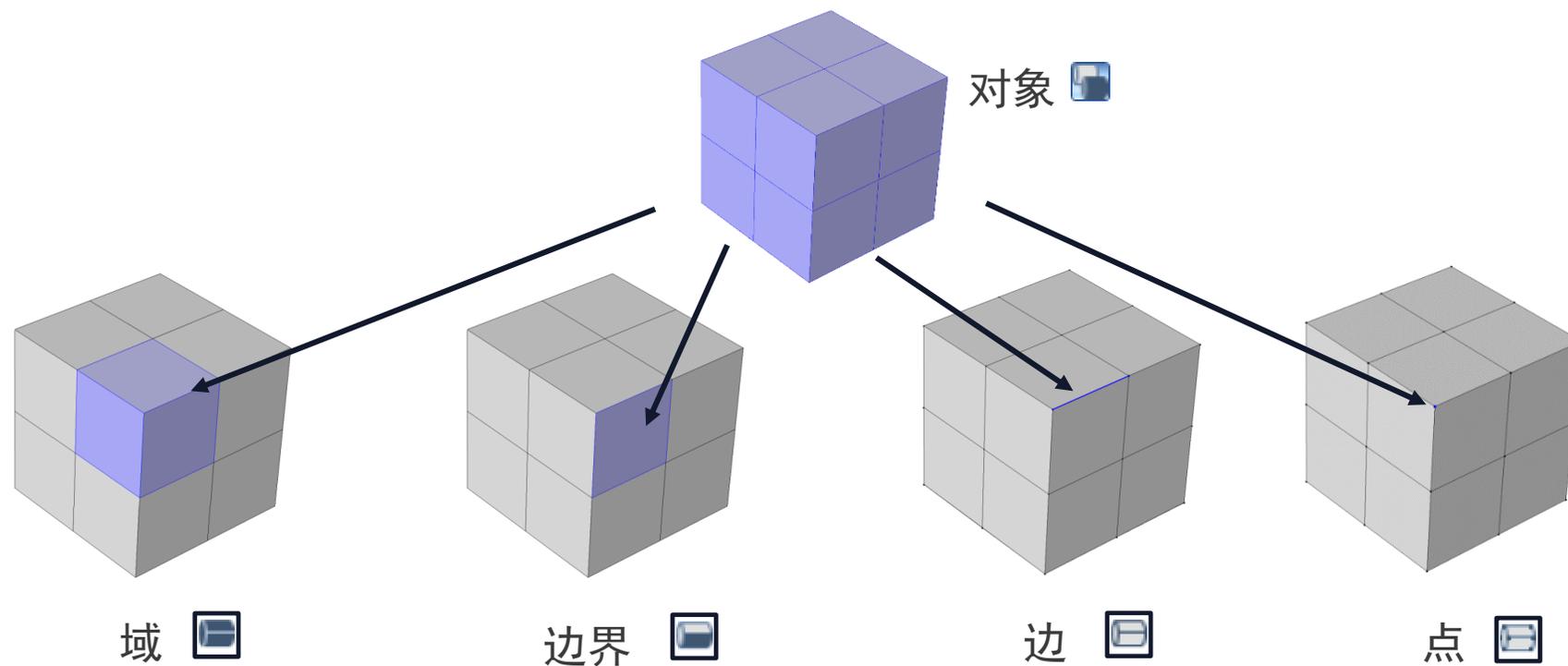
# 基本的几何建模功能

# 几何模型的构成

- 概念上讲，几何模型是一个由体、面、曲线或点这些有界的几何实体的合集。
- 最高维度的几何实体称为域，次高维度的几何实体称为边界。

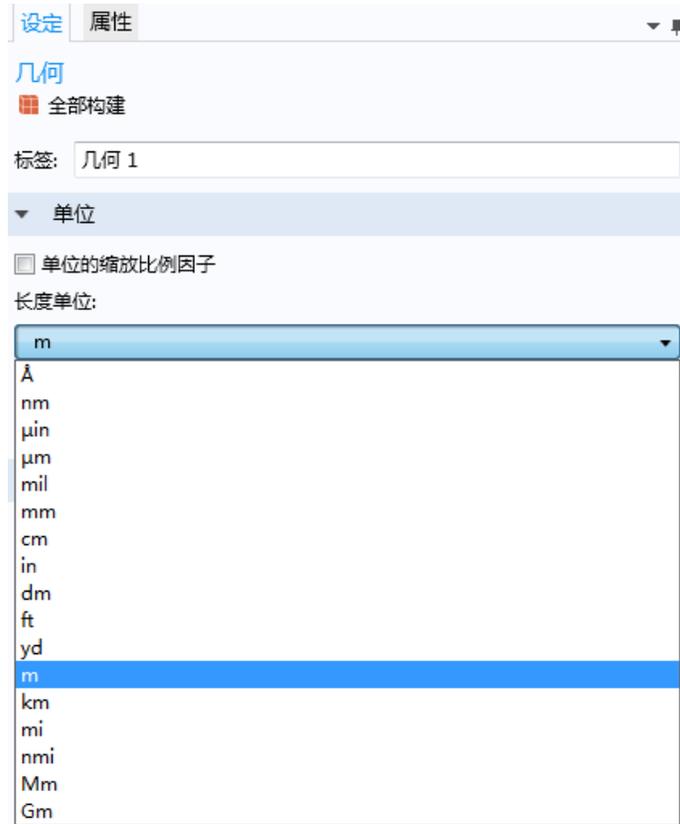
几何实体维度	三维模型	二维模型	一维模型	零维模型
三维	域			
二维	边界	域		
一维	边	边界	域	
零维	点	点	边界	域

# 几何对象和实体 (三维)



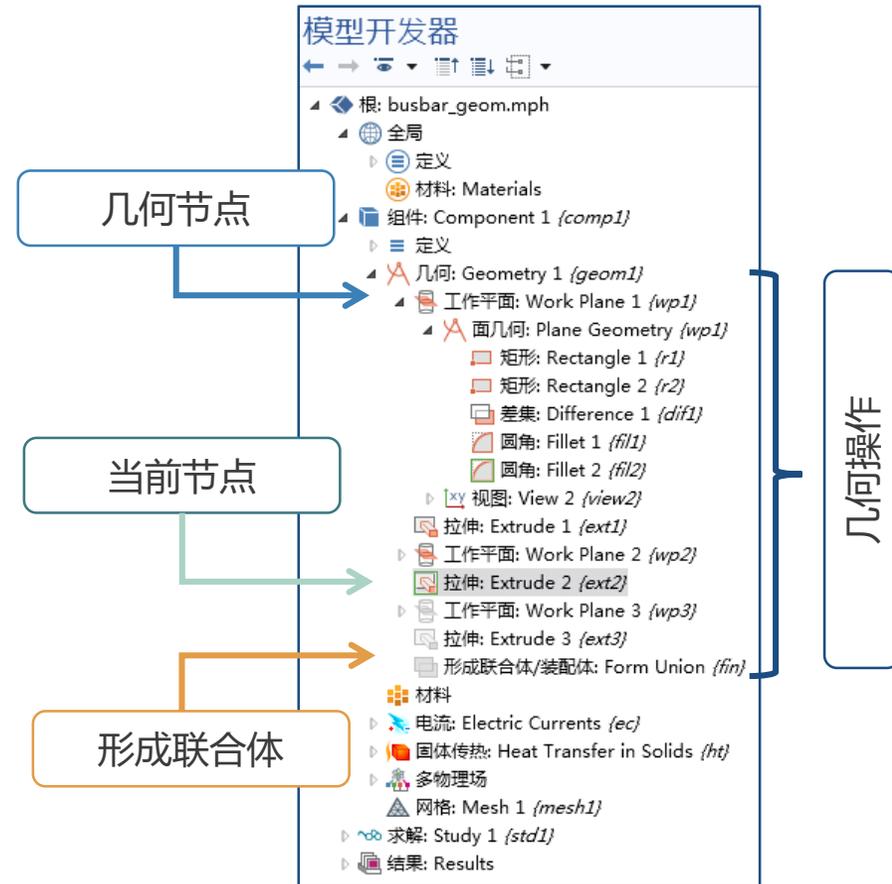
# 几何节点- 单位

- 用来描述几何长度及可视化的单位
- 求解模型时，自动转化为根节点设定窗口中指定的单位系统
- 单位的缩放比例因子复选框：
  - 勾选:  $1[\text{m}] \rightarrow 1000[\text{mm}]$
  - 取消:  $1[\text{m}] \rightarrow 1[\text{mm}]$

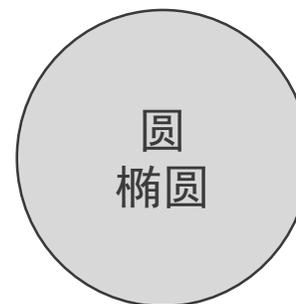


# 几何序列 - 基本

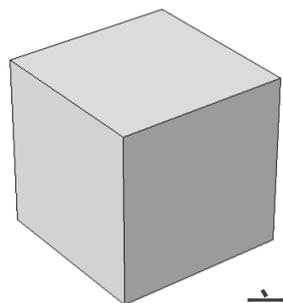
- 点击模型开发器中的节点，查看和修改几何操作的设定
- 在序列中启用或禁用几何操作
- 完全参数化的几何



# 二维基本对象



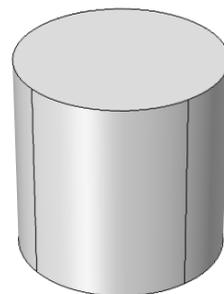
# 三维基本对象



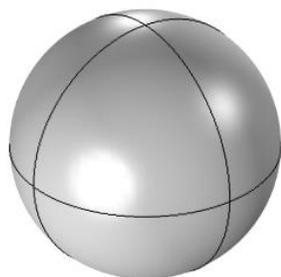
立方体



圆锥体



圆柱



球



螺旋

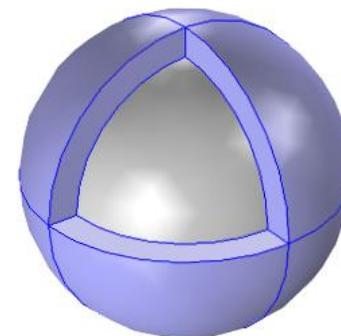
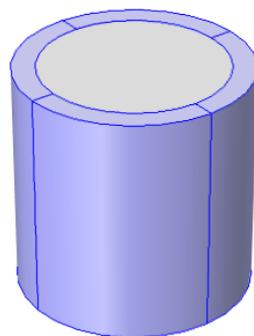
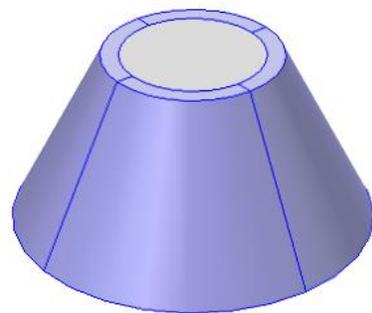
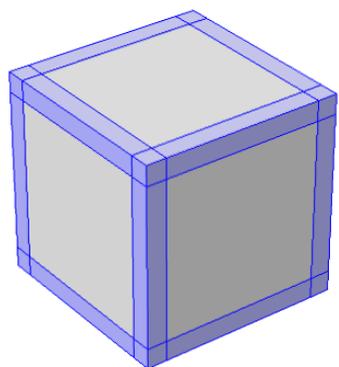


环面

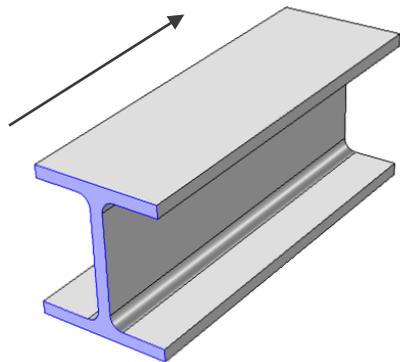
更多体素

- 贝塞尔多边形
- 偏心圆锥
- 椭球
- 六面体
- 插值曲线
- 线段
- 参数化曲线
- 参数化曲面
- 点
- 多边形
- 金字塔
- 四面体

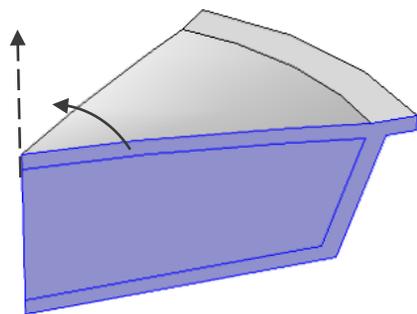
# 部分基本对象可定义层



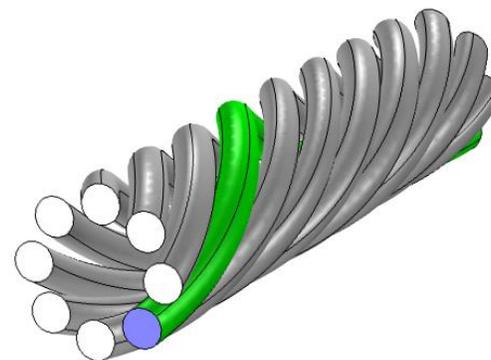
# 可以通过二维对象构建三维对象



拉伸

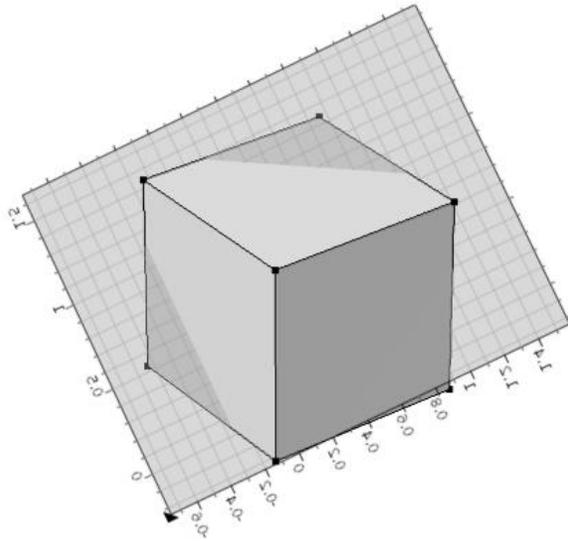


旋转

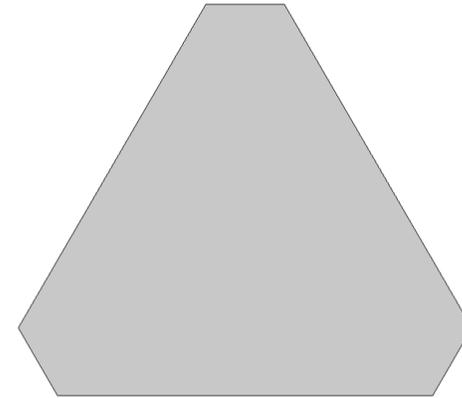


扫掠（以及三维旋转）

# 从三维也可以提取二维结构



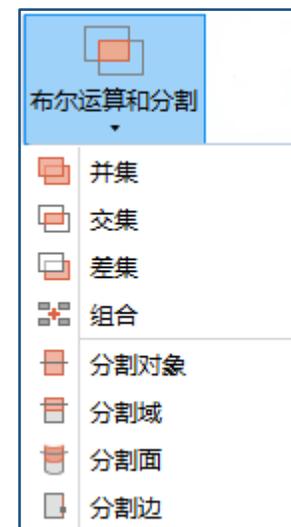
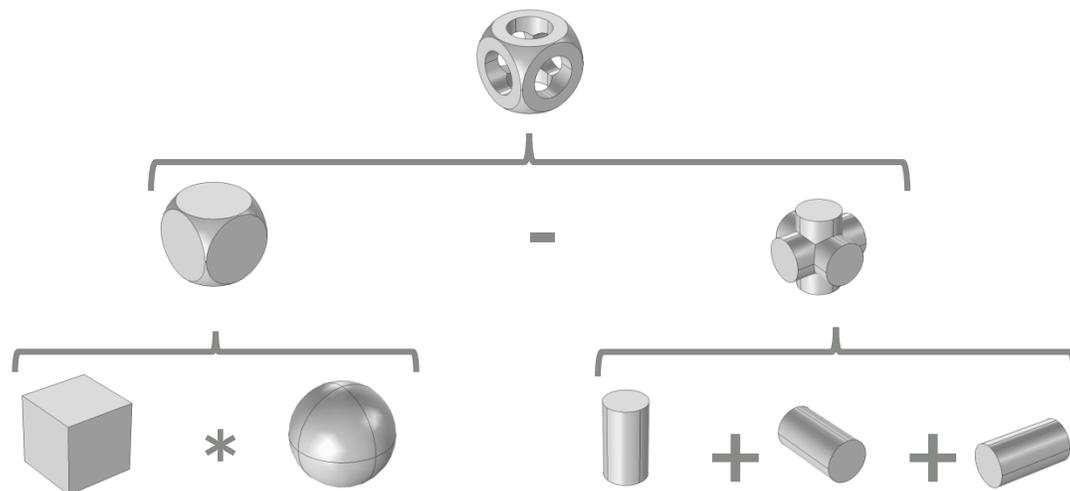
一个立方体  
一个工作平面



二维截面

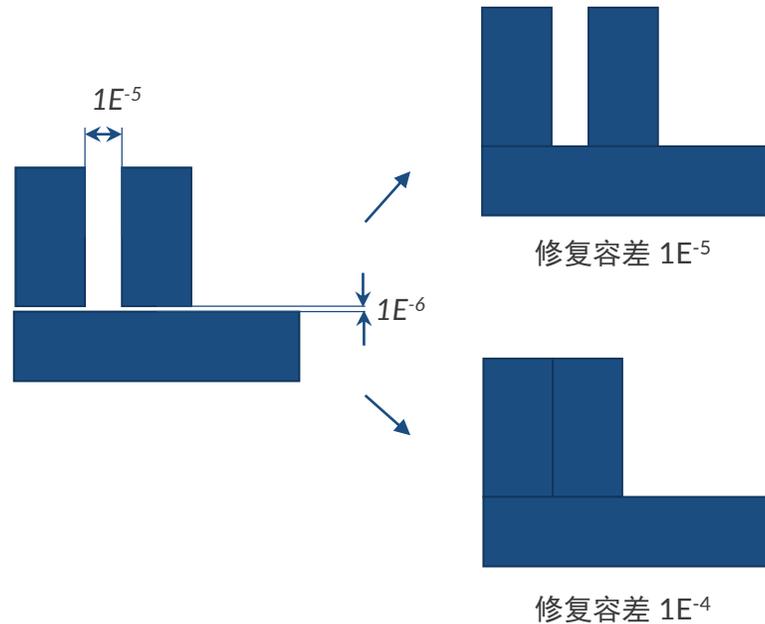
# 布尔操作

- 适用于不同对象
- 创建复合的几何对象



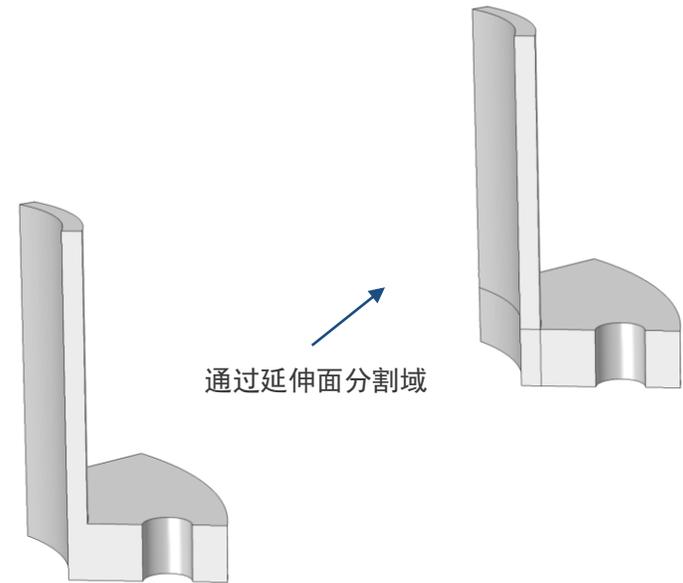
# 布尔操作的容差

- 容差的三个选项
  - 自动
  - 绝对修复容差
  - 相对修复容差
- 相对容差是绝对容差除以输入对象的最大坐标。
- 几何实体之间的距离小于绝对容差时会进行合并



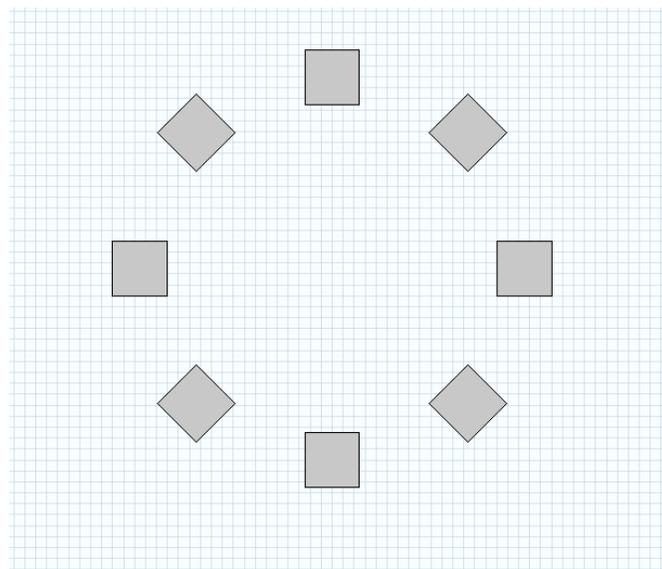
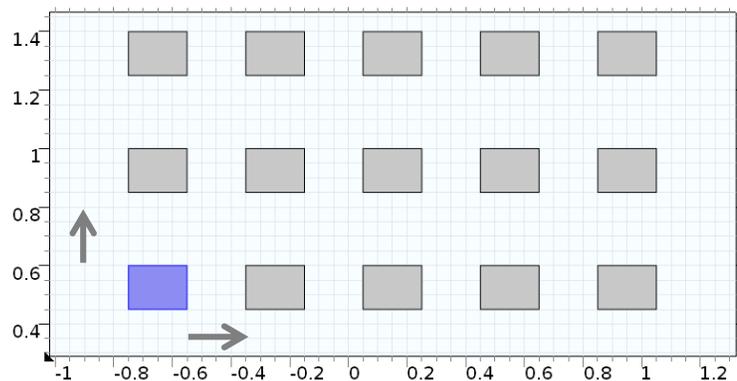
# 分割操作

- 通过对象、工作面、面、边、点实现分割对象、域、边界、边
- 以便于网格剖分等操作



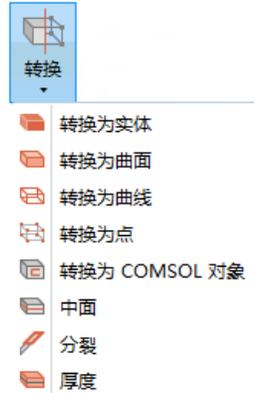
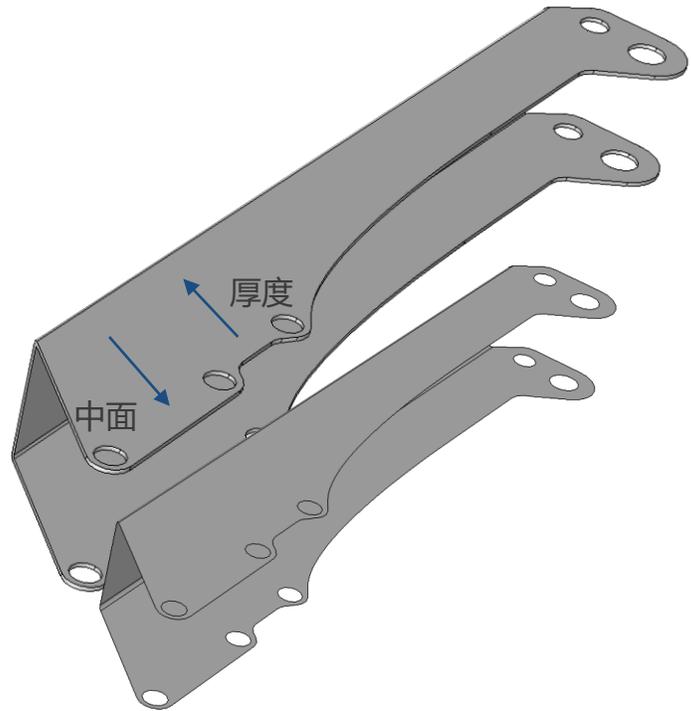
# 变换

- 适用于不同对象
- 线性或矩形阵列

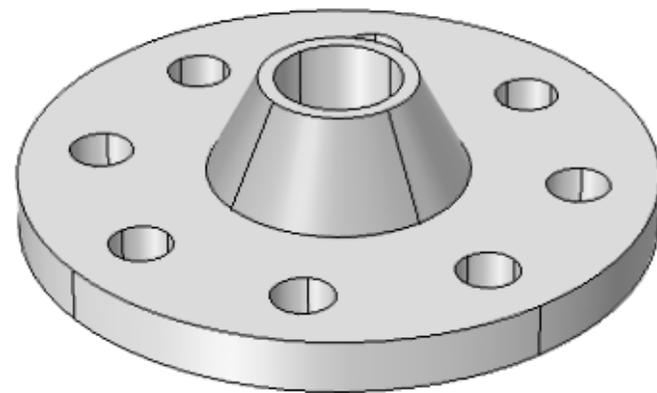
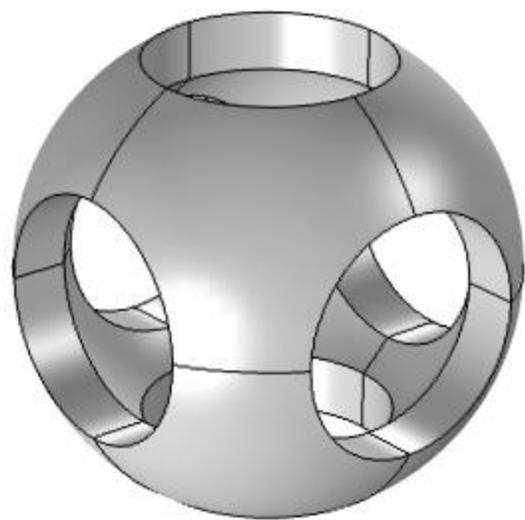


# 转换

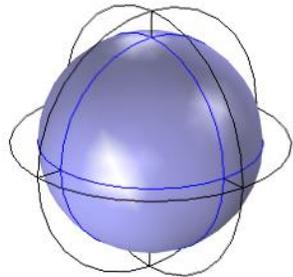
- 合并或转换几何对象为实体、曲面、曲线或点对象
- 在 CAD 导入模块或设计模块中转化为 COMSOL 所需几何对象
- 把对象分割为更低维度的几何实体
- 设计模块下的中面和厚度操作



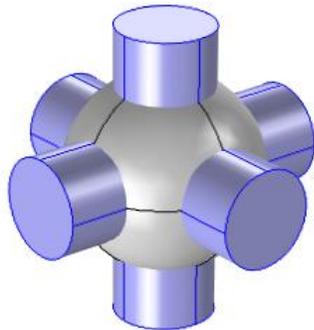
来做一些练习...



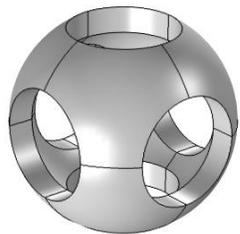
# 一种解决方案...



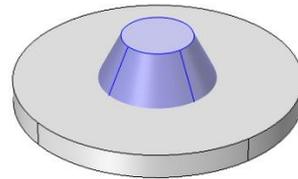
- 1) 画一个带层的球
- 2) 删除内部域



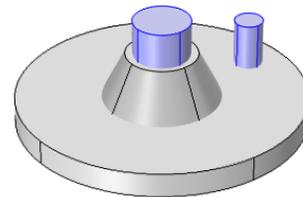
- 3) 画一个圆柱
- 4) 旋转、拷贝
- 5) 重复



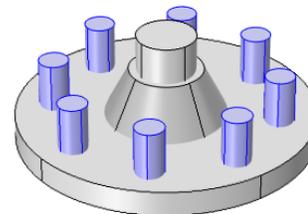
- 6) 布尔运算-差集



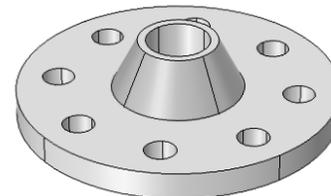
- 1) 画一个圆柱
- 2) 画一个圆锥



- 3) 画一个圆柱
- 4) 画一个偏心圆柱



- 5) 按一定角度旋转

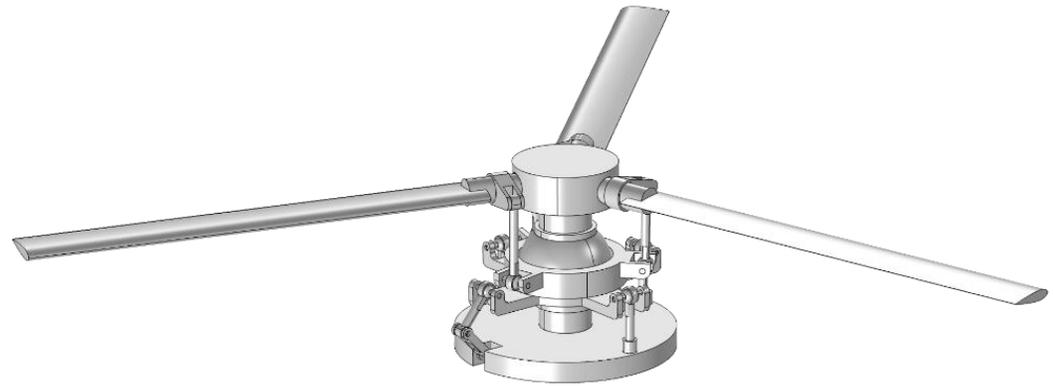


- 6) 布尔运算-差集

# 形成描述物理场和网格的几何

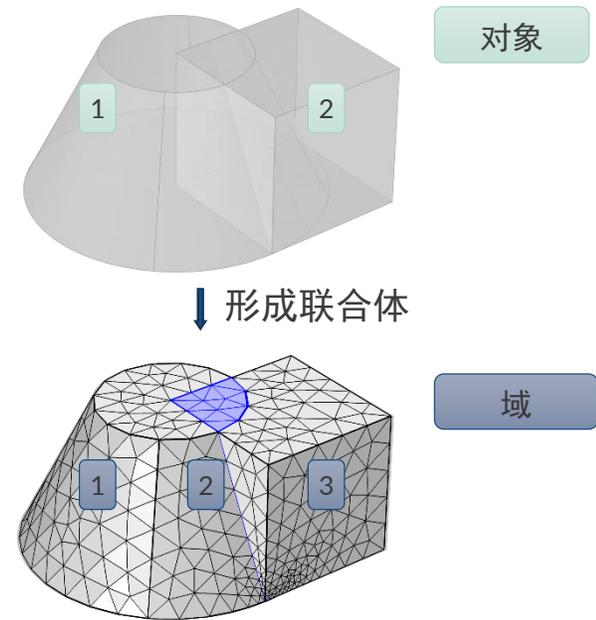
- 几何序列
  - 许多几何对象
- 物理场和网格
  - 包含多个区域的对象
- 形成对象的两个方法
  - 形成联合体（默认）
  - 形成装配体

- 考虑几何对象是否连接在一起



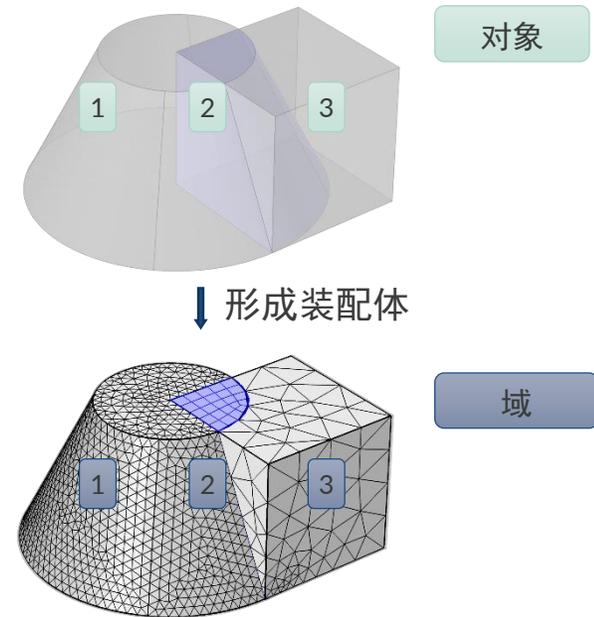
# 形成联合体

- 所有几何对象形成一个联合体
- 整个对象被边界自动地分为多个不同区域
- 重叠部分形成新的区域
- 最终区域可以非连续
- 在消息窗口显示几何信息



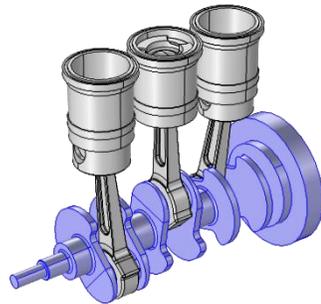
# 形成装配体

- 几何看做非连续区域构成的集合
- 通过接触边界形成的一致对/接触对来实现连续性
- 一些接口中的特定边界需要通过形成装配体来使用
  - 如连接，接触等



# 形成装配体-举例

- 在发动机的多体动力学分析中需要采用装配体
- 位于 App 库
  - Multibody Dynamics Module > Automotive and Aerospace > reciprocating engine

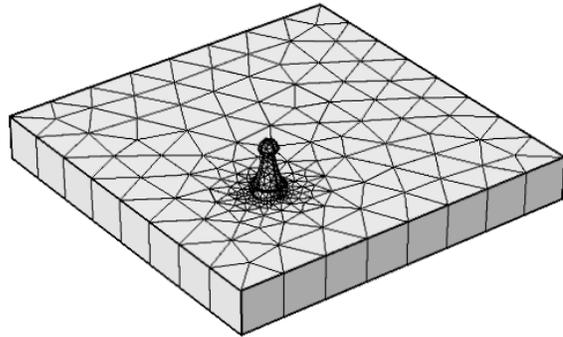


# 什么时候必须使用装配体？

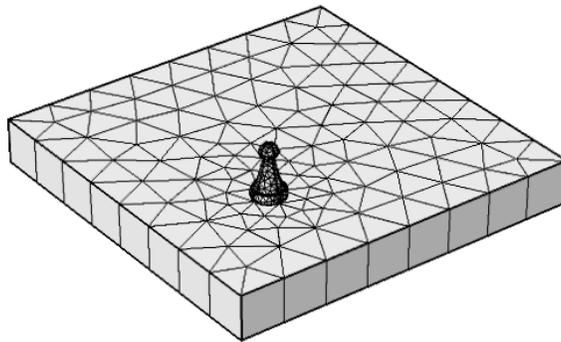
- 当两个对象形成接触时
  - 在形成装配体步骤产生接触对
  - 结构力学接触（MEMS 和结构力学模块）
- 求解域绕其他域发生旋转
  - 在形成装配体步骤产生一致对
  - 旋转电磁场（AC/DC 模块）
  - 流体混合（搅拌器模块）
- 其他一些可能强调在接触对和一致对上的连续性的物理场
  - 例如，由于结构接触使得两个接触体之间传热

# 什么时候可能会用到形成装配体？

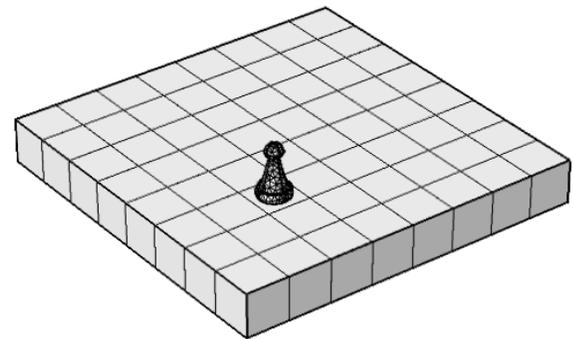
不同对象不需要使用连续的网格



形成联合体  
边界网格匹配  
通量、力等自动连续，精确  
匹配



形成带印记的装配体  
边界网格匹配  
通量、力等不是自动连续，并不  
完全精确匹配



形成不带印记的装配体  
边界网格不匹配  
精度最小  
计算要求最小

# 什么时候不能使用装配体？

求解带旋度-旋度方程的物理场（例如 Maxwell 方程）

- 三维电磁波（RF 和波动光学模块）
- 所有的三维磁矢量场方程（AC/DC 模块）

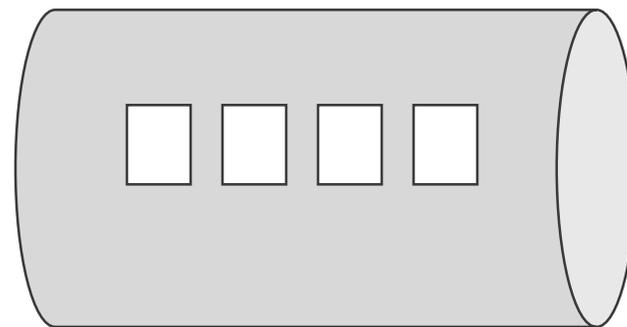
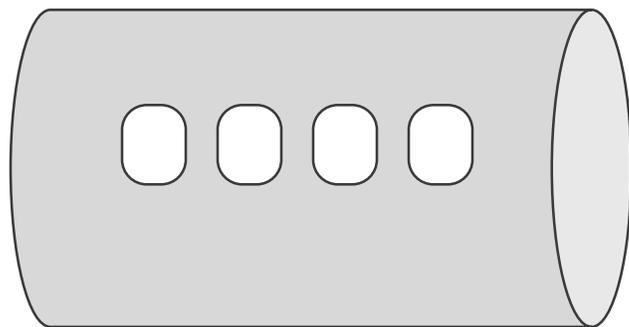
我们一定要使用精确的几何吗？

**NO!**

至少最初的一些测试原型模型就不需要…

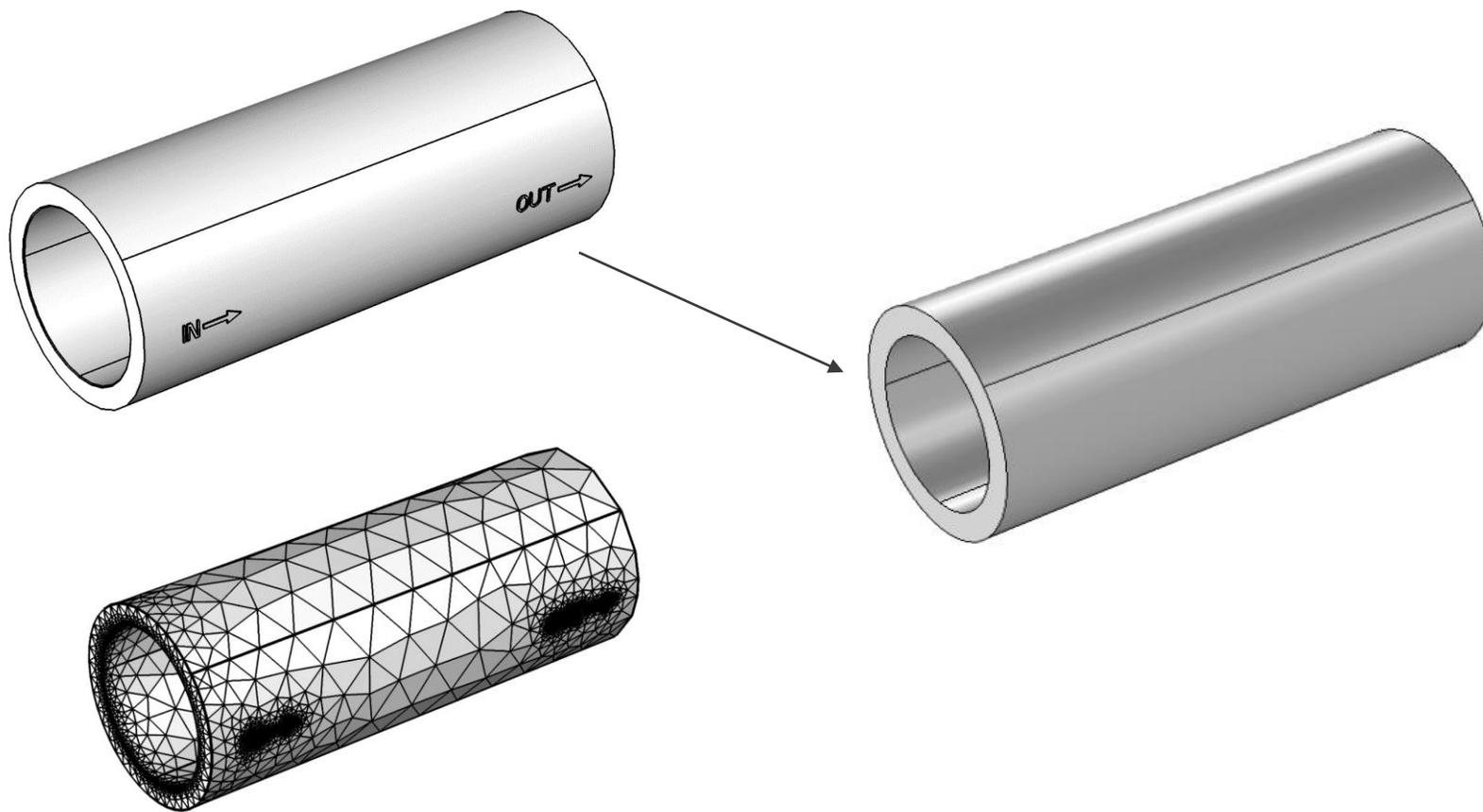
# 五大几何建模的建议

## 1) 处理角部细节



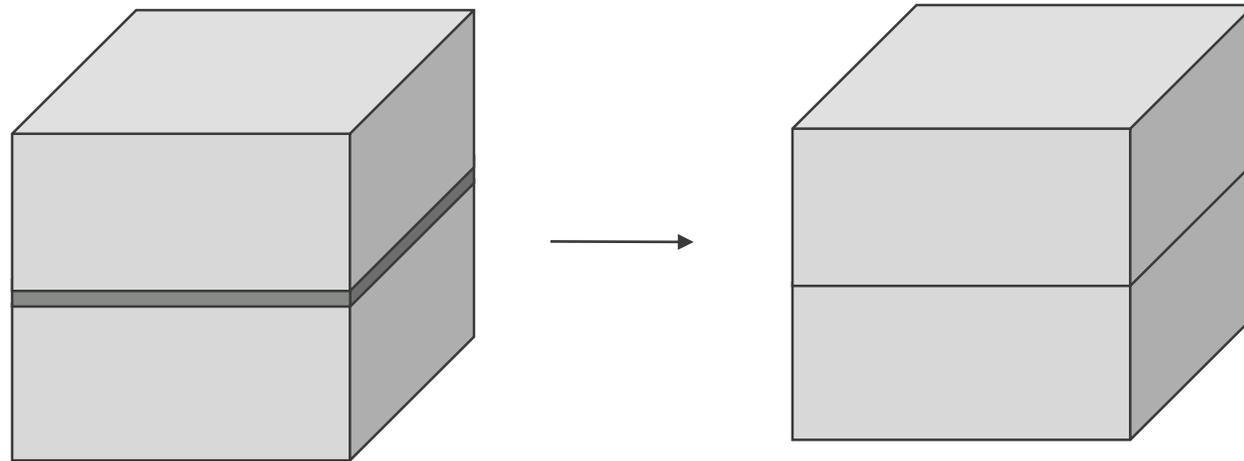
# 五大几何建模的建议

## 2) 简化处理不必要的细节



# 五大几何建模的建议

## 3) 薄层结构



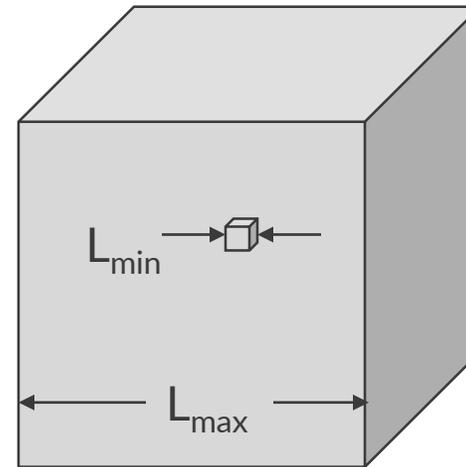
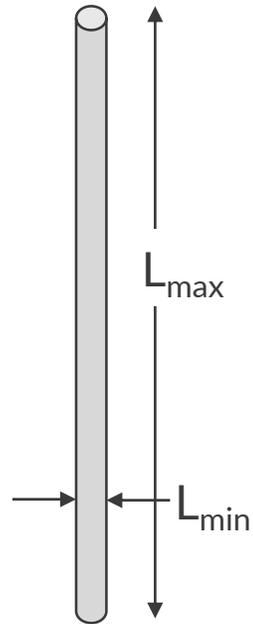
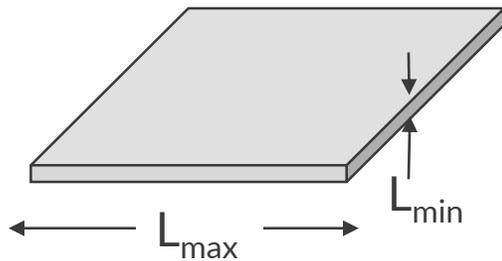
基本上所有的（专业模块）物理场接口中都提供了将薄层材料处理成边界条件的选择

# 五大几何建模的建议

## 4) 大尺度比例关系

$$L_{\max} \gg 100 L_{\min} \quad (\text{三维})$$

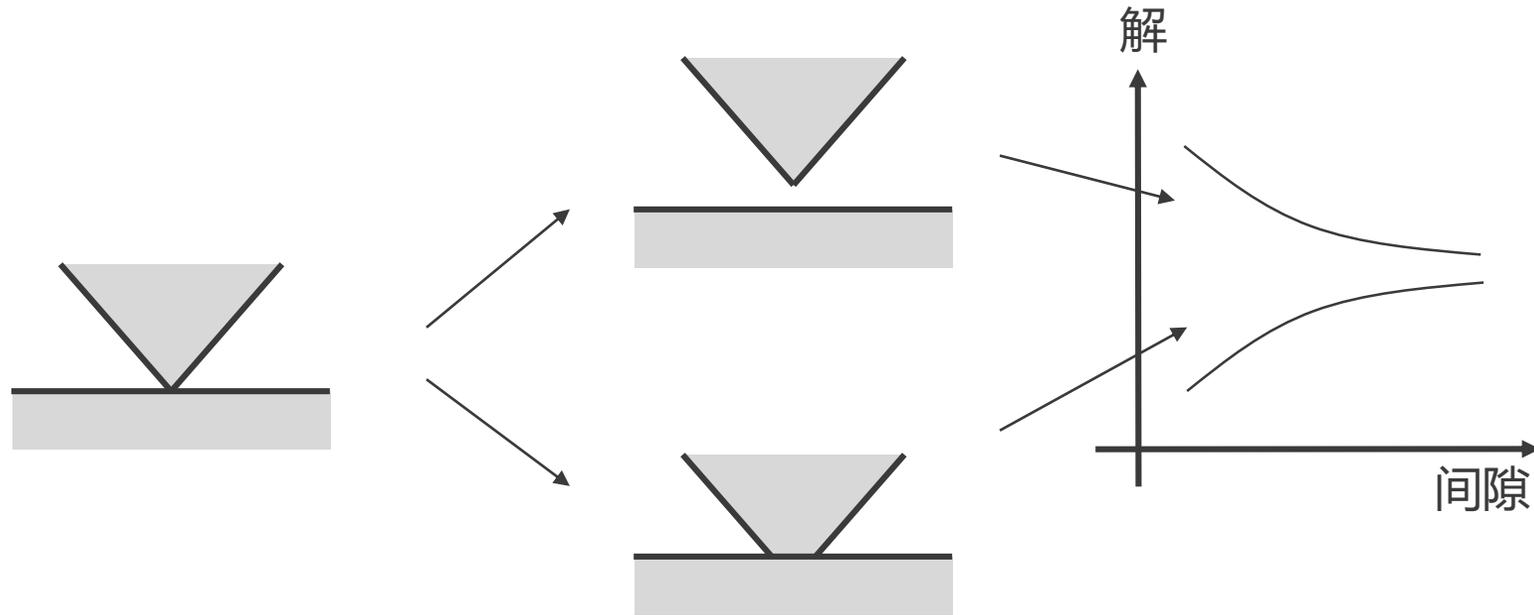
$$L_{\max} \gg 1000 L_{\min} \quad (\text{二维})$$



考虑删除最小的特征，或假设在一个（或两个）维度方向上可以忽略结果的变化

# 五大几何建模的建议

## 5) 处理点接触



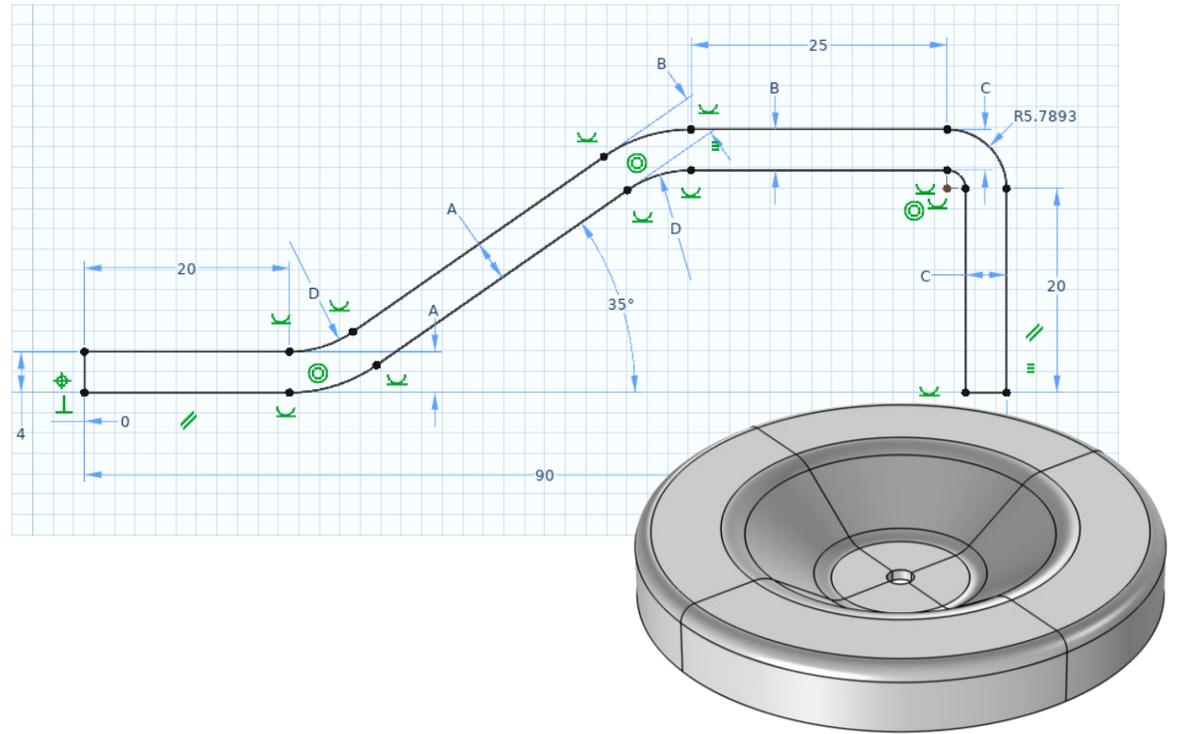
对于点接触，一般可以使用间隙或重叠来取代，并分析间隙越来越小时的结果

# 草图功能

高级和高效的 2D 几何绘制功能

# 草图功能简介

- 可以在图形窗口交互式绘制和编辑几何图形，该功能可用于平面绘图
- 所有对象均以线框渲染的方式显示
- 实现更复杂的几何图形绘制
- 设计模块中的约束和尺寸



2D 草图中绘制平面几何，并通过旋转成 3D 实体结构

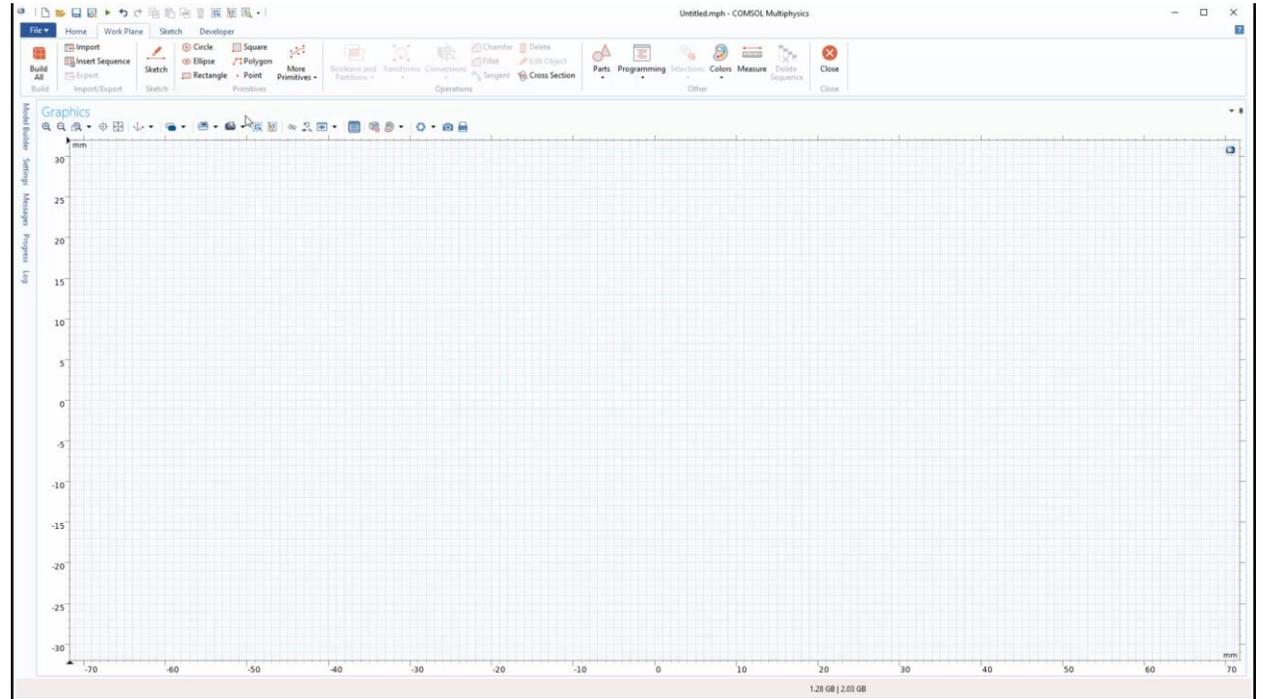
# 交互式绘图

## ■ 绘图基元

- 多边形
- 圆弧
- 插值曲线、贝塞尔曲线
- 矩形、圆、椭圆

## ■ 圆角

## ■ 复合曲线



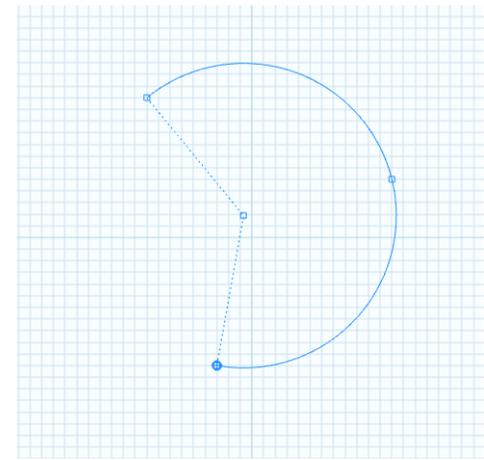
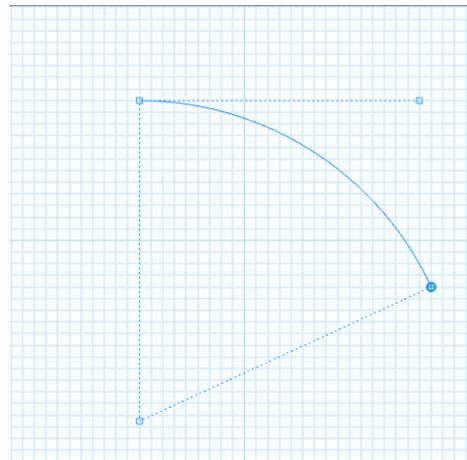
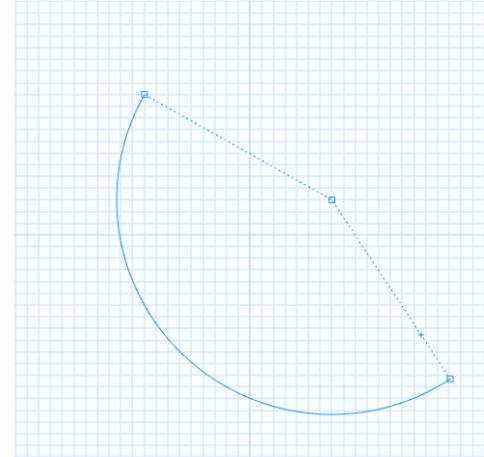
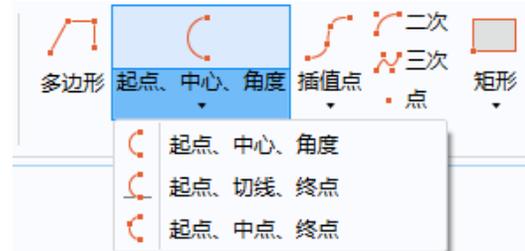
# 圆弧

- 圆弧标准方程

- $x^2+y^2+Dx+Ey+F=0$

- 三种绘制方法

  - 起点、中心、角度
  - 起点、切线、终点
  - 起点、中点、终点



# N 次插值曲线

## ■ 插值曲线方程

—  $x(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + \dots + a_nt^n$

—  $y(t) = b_0 + b_1t + b_2t^2 + \dots + b_nt^n$

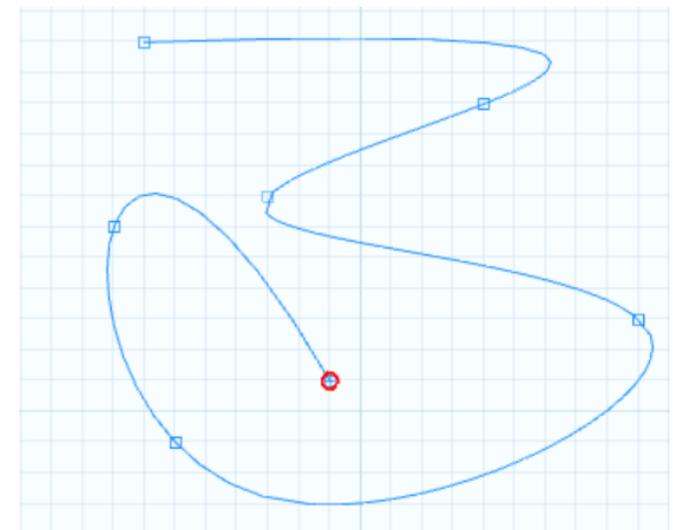
## ■ 两种绘制方法

— 插值点

— 起点、切线、其他标记

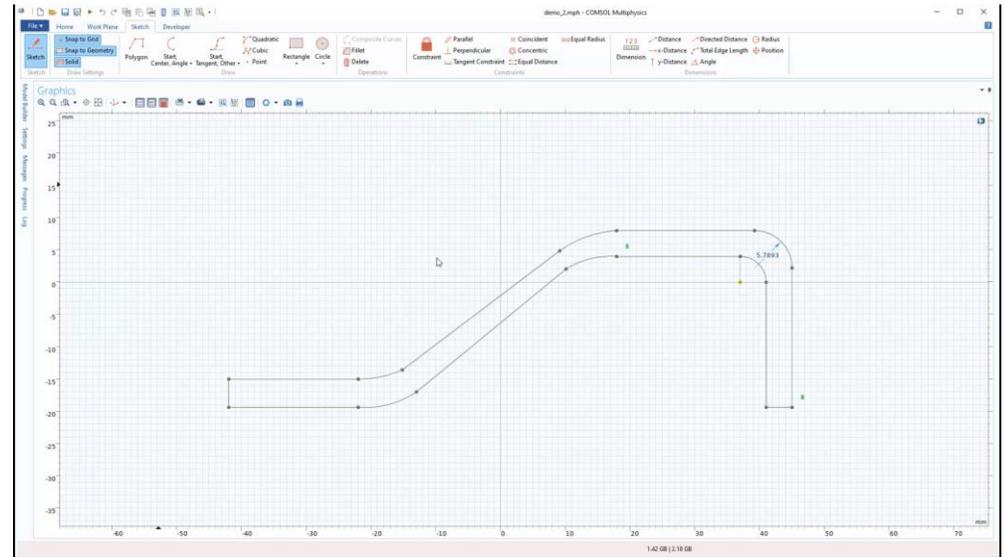


x (m)	y (m)	约束
-0.45	1.1	
0.35	0.95	
-0.3	0.65	
-0.5	0.75	
-0.5	0.45	
0.3	0.35	
0.3	-0.05	
-0.4	-0.25	
-0.75	0.1	

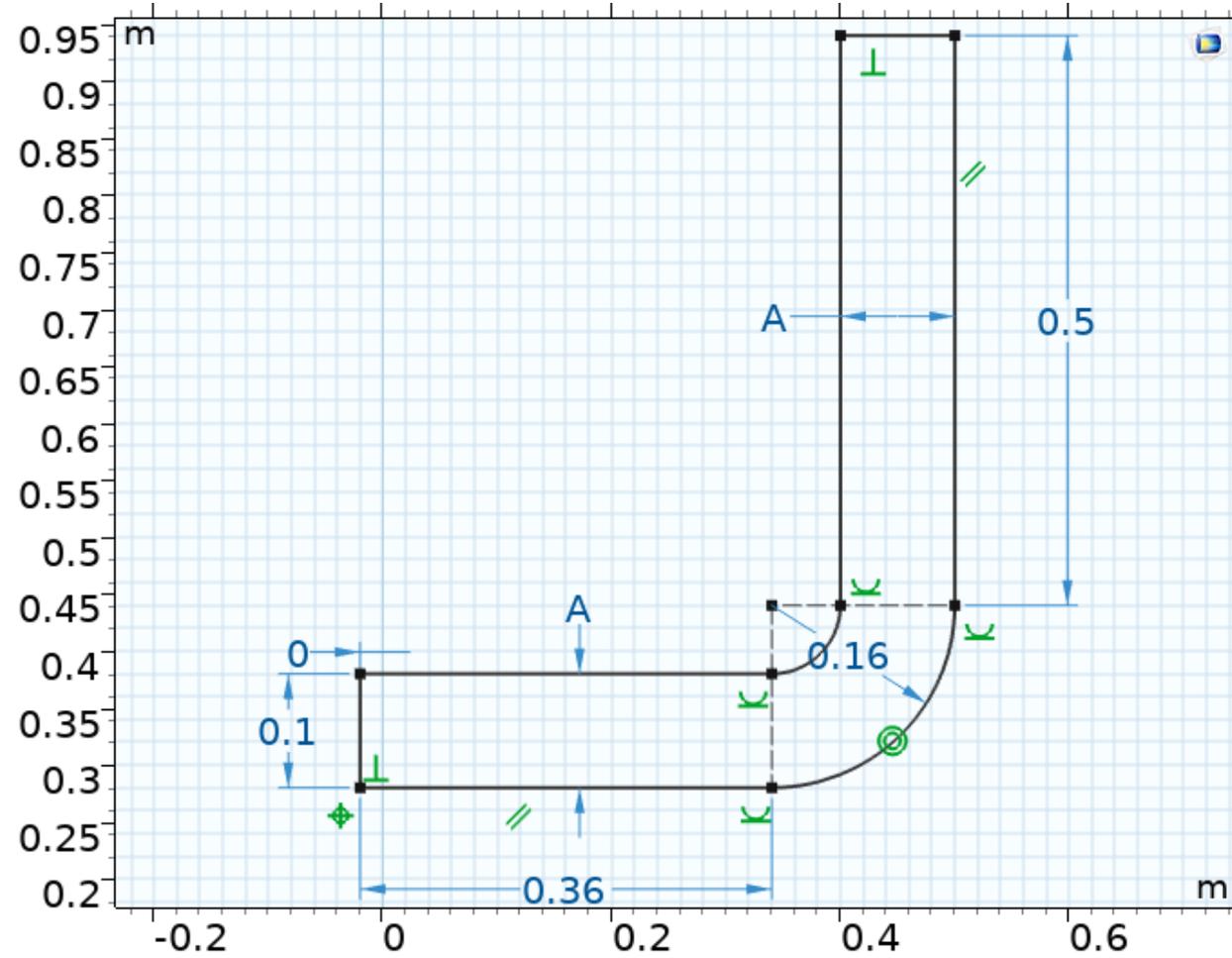


# 约束和尺寸

- 交互式地约束不同几何特征之间的关系
- 交互式地指定位置、距离和角度等
- 设计模块包含的功能



# 练习:

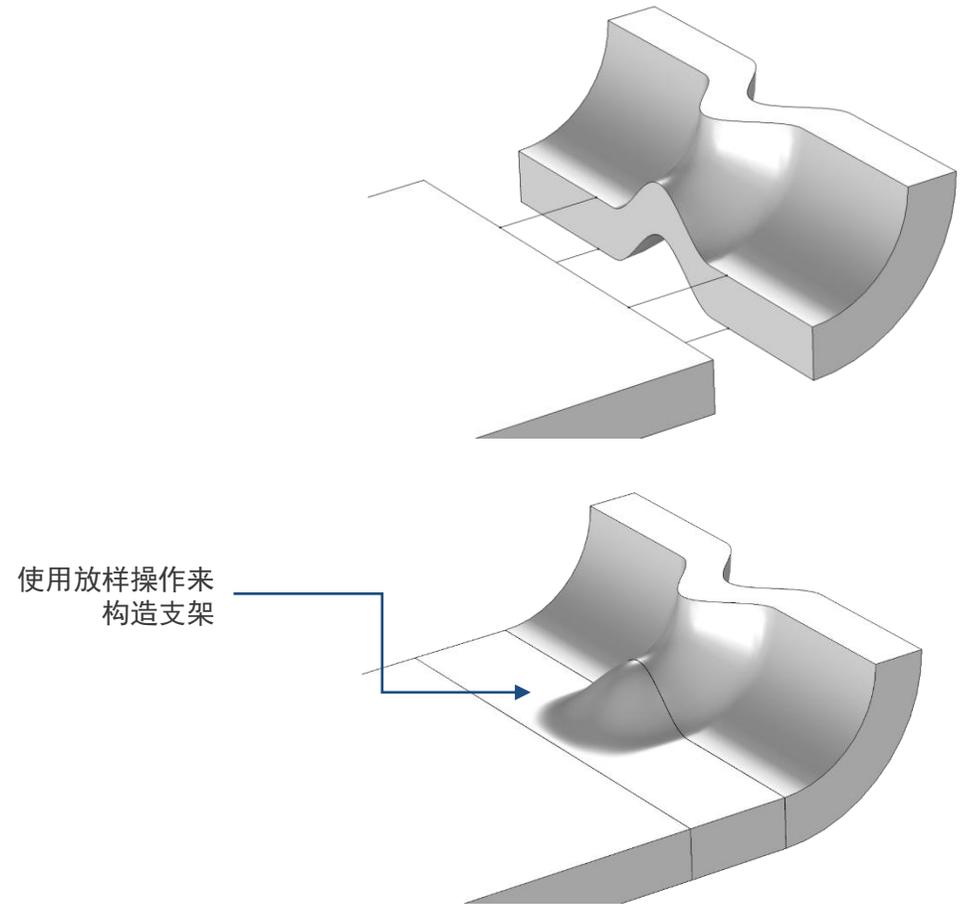


# 设计模块功能

放样、中面、厚度、圆角、倒角

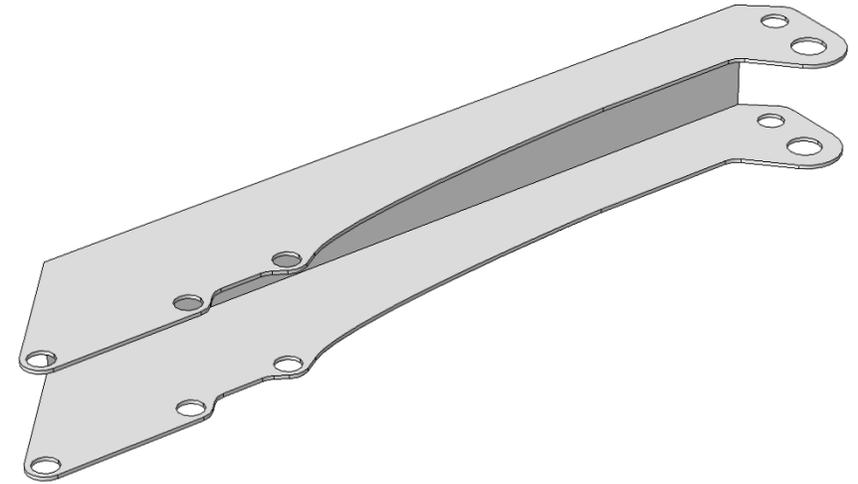
# 放样

- 从截面剖面创建放样对象
- 在启动和结束剖面控制放样方向
- 用点来表示启动和结束剖面
- 使用引导线来控制形状

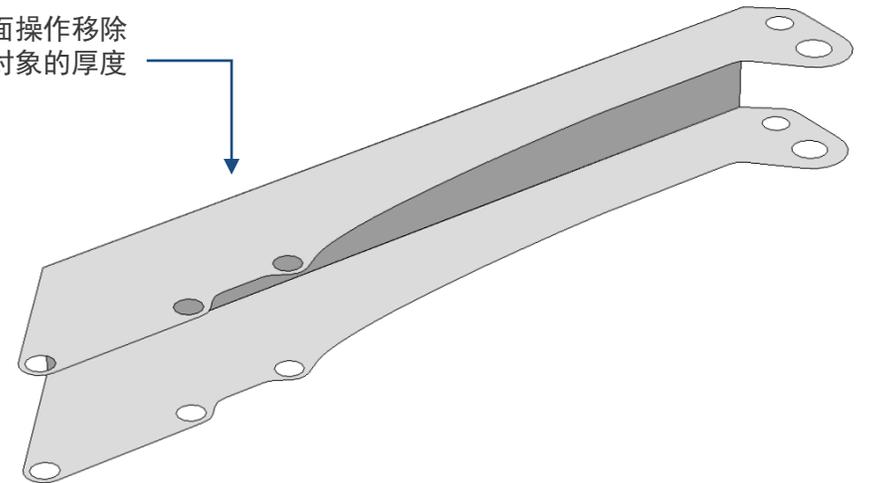


# 中面和加厚

- 利用抽取中面操作除去实体对象的厚度
  - 用于利用壳接口建模
- 为面对象添加厚度使其转变为实体对象
  - 以对称或者非对称的方式创建厚度
  - 控制添加的材料的厚度方向

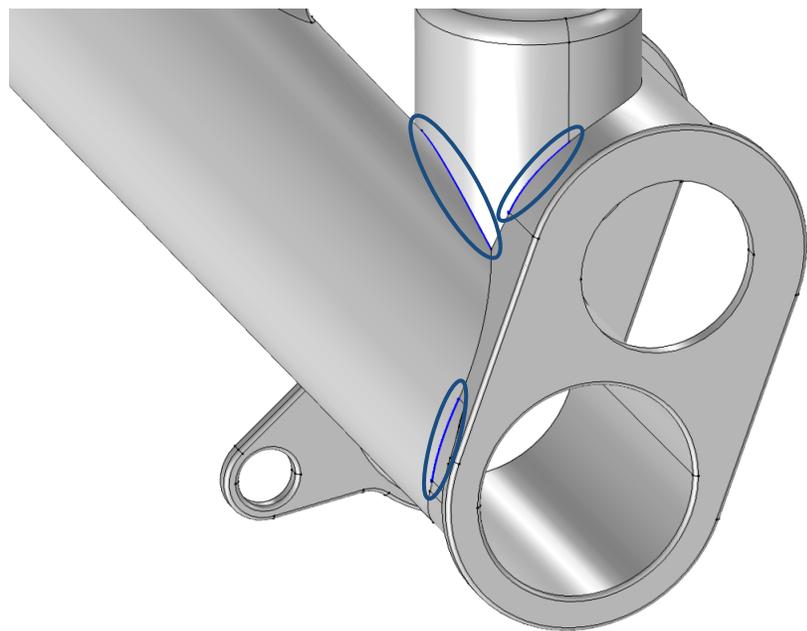


抽取中面操作移除  
实体对象的厚度

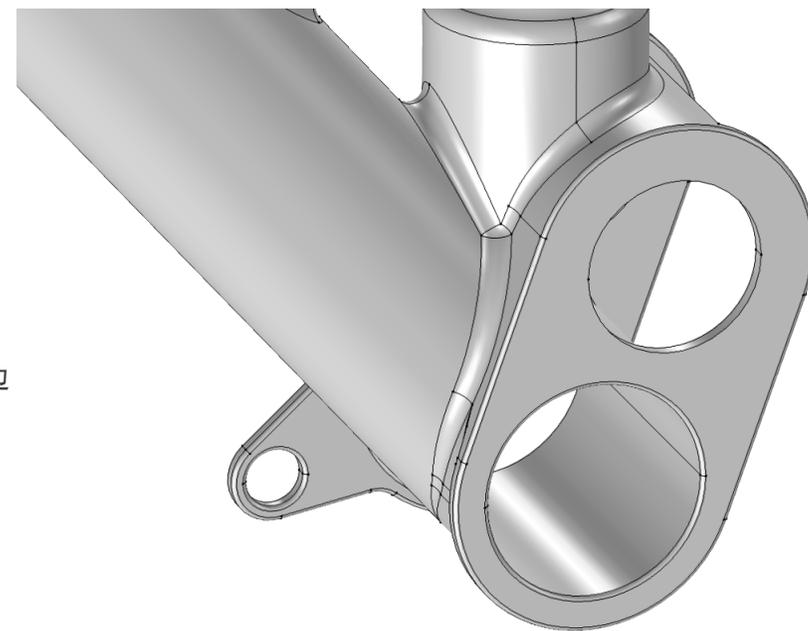


# 3D 圆角和倒角

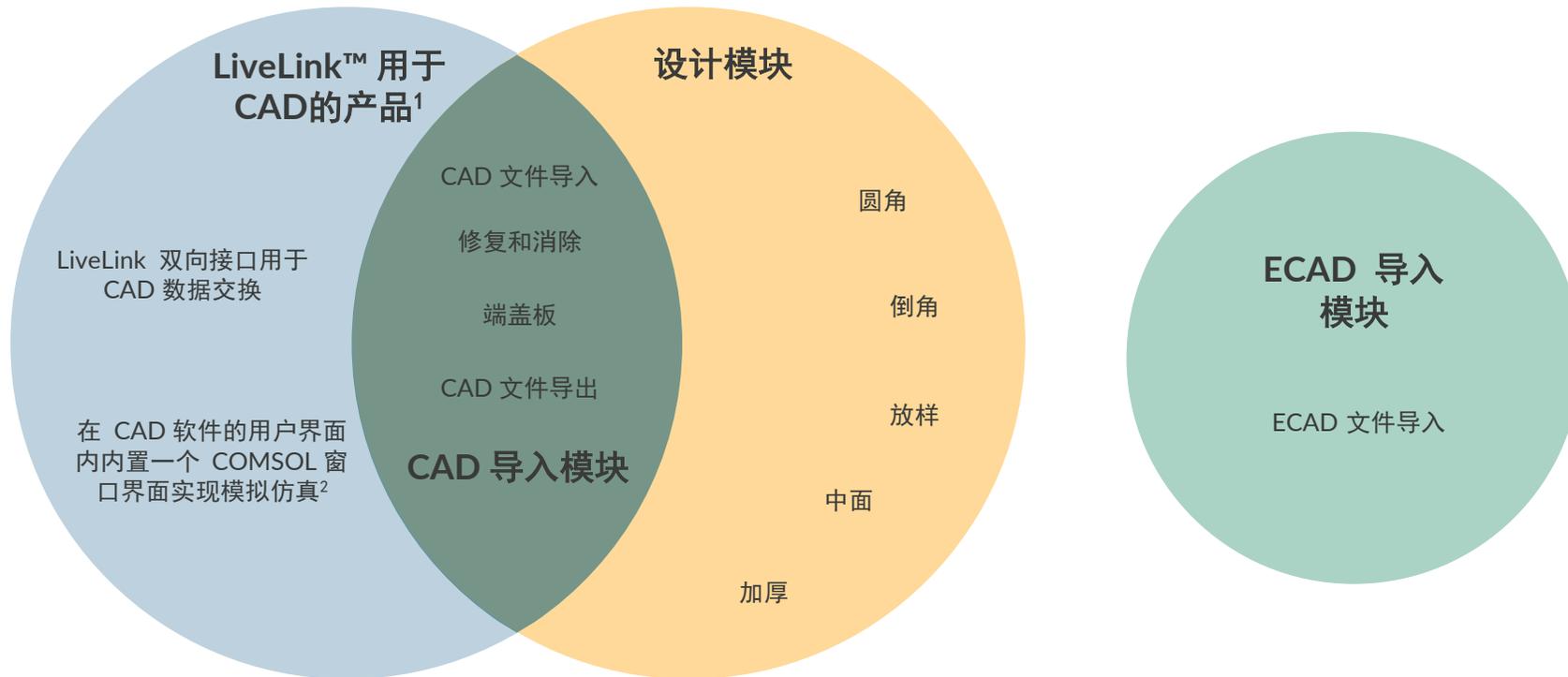
对三维几何对象的角实现指定数值半径的圆角和倒角



对高亮的边施加圆角操作将自动与相邻边界相切来得到圆角



# CAD 和 ECAD 导入功能



<sup>1</sup>LiveLink™ for AutoCAD®, LiveLink™ for Inventor®,  
LiveLink™ for PTC® Creo® Parametric™,  
LiveLink™ for PTC® Pro/ENGINEER®,  
LiveLink™ for Revit®, LiveLink™ for Solid Edge®,  
LiveLink™ for SOLIDWORKS®

<sup>2</sup>LiveLink™ for Inventor®, LiveLink™ for SOLIDWORKS®

# 支持的 ECAD 文件格式

- GDS-II

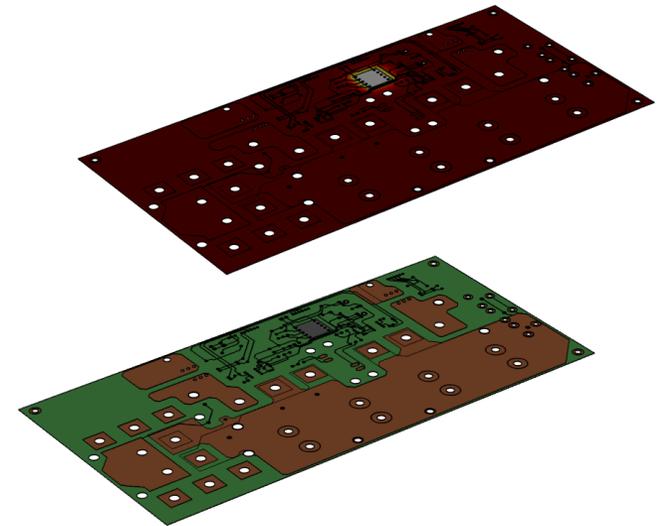
- 用于集成电路 (IC) 和 MEMS 器件的导入
- 包含单元定义库的二进制文件
- 导入时需要指定层厚度和高度

- ODB++® 和 ODB++(X)

- 用于印刷电路板 (PCB) 的导入
- 能包含制造 PCB 板所需层厚度和高度等大部分信息的文件档案

- NETEX-G

- 用于来自 Gerber 文件的 PCB 板导入
- 使用来自 Artwork ([www.artwork.com](http://www.artwork.com)) 的 NETEX-G 软件来准备来自 Gerber 和 drill 文件的 NETEX-G 文件



PCB 几何文件由 Hypertherm, Inc., Hanover, NH, USA 提供

Support for implementation of the ODB++ Format was provided by Mentor Graphics Corporation pursuant to the ODB++ Solutions Development Partnership General Terms and Conditions (<http://www.odb-sa.com/>). ODB++ is a registered trademark of Mentor Graphics Corporation.

# 支持的CAD文件格式

文件格式 <sup>1, 2</sup>	扩展名	导入的版本	导出的版本
Parasolid®	.x_t, .x_b	up to v33.0	v33.0
SAT® (ACIS®)	.sat, .sab	up to 2020 1.0	4.0, 7.0, 2016 1.0
STEP	.step, .stp	AP203, AP214	AP203
IGES	.igs, .iges	up to 5.3	5.3
Autodesk® AutoCAD®	.dwg, .dxf	2.5-2021	x
Autodesk® Inventor® part	.ipt	6-2021	x
Autodesk® Inventor® assembly	.iam	11-2021	x
NX™	.prt	up to v1899	x
PTC® Pro/ENGINEER®	.prt, .asm	16 to Wildfire® 5.0	x
PTC® Creo® Parametric™	.prt, .asm	1.0-7.0	x
SOLIDWORKS®	.sldprt, .sldasm	98-2020	x
CATIA® V5 <sup>3</sup>	.CATPart, .CATProduct	R8-2020	x

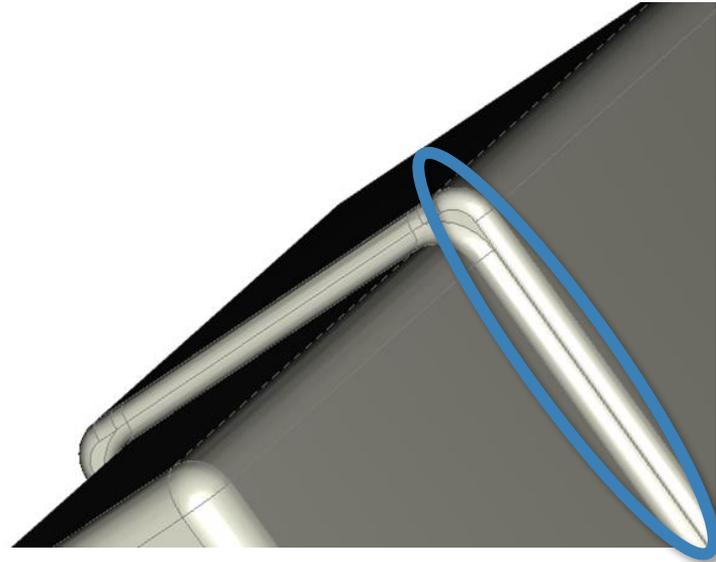
<sup>1</sup> COMSOL Multiphysics®支持面网格格式 3MF, PLY, STL和VRML, 有关所有支持的网格和CAD格式的最新列表, 请参阅 [comsol.com/products/specifications/cad](https://www.comsol.com/products/specifications/cad)

<sup>2</sup> 不是所有的格式支持所有的平台, 最新的信息请查看 [comsol.com/system-requirements/module](https://www.comsol.com/system-requirements/module)

<sup>3</sup> 需要 CATIA® V5 的文件导入的许可证文件

# 有限元分析中的 CAD 设计

- 零件设计时：
  - CAD 建模完成后使用圆角和倒角
  - 去掉物理影响比较小的特征
  - 避免狭长面
- 组件设计中：
  - 避免组件的校准误差
  - 避免连接面上存在分离设计
  - 移除模型中的小缝隙或间隙
  - 尝试在其他模型基础上重建



# 导入选项

- 导入实体、表面、曲线和点
- 几何长度单位为“根据 COMSOL”或根据“CAD 文件”
- 自动修复导入的对象
- 指定导入几何的缺陷位置和类型

设置  
导入  
构建选定对象 构建所有对象

标签: 导入 1

源:  
三维 CAD 文件

文件名:  
浏览... 导入

长度单位:  
来自 COMSOL

要导入的对象

实体

表面

对于面对象:  
形成实体  
 填充孔

曲线和点

合并曲线对象

导入选项

绝对导入容差:  
1E-5

检查导入对象的错误

修复导入的对象

移除冗余的边和顶点

# 自动修复

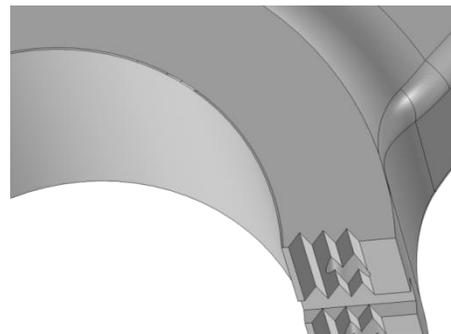
- 去除短边、小面及长条面
- 合并间隙
- 去除自交叉、尖端和不连续
- 修改无效的拓扑结构
- 定义导入的几何为绝对导入容差  $10^{-5}$  个单位



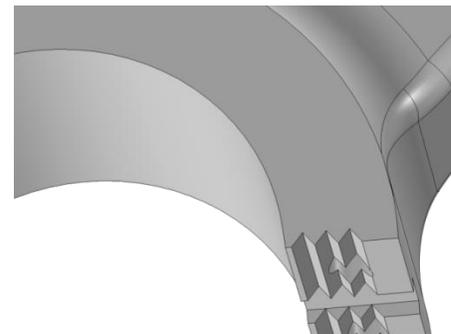
# CAD 修复

CAD 文件导入的几何可进行修复

- 修复 - 类似于导入过程中的自动修复
- 粘合至实体 - 愈合间隙，创建闭合曲面或实体

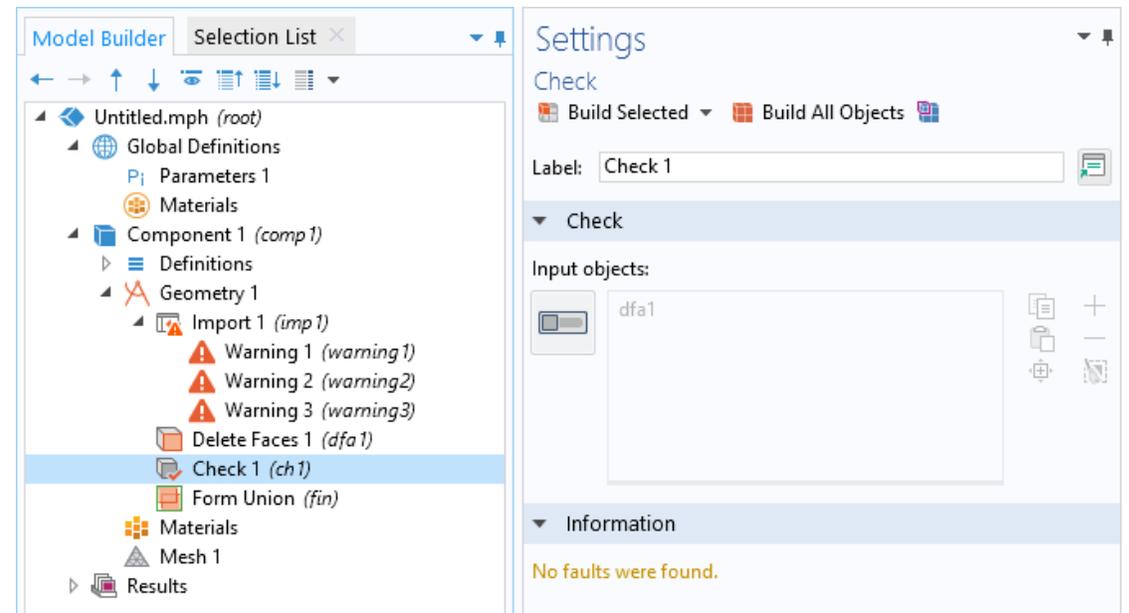
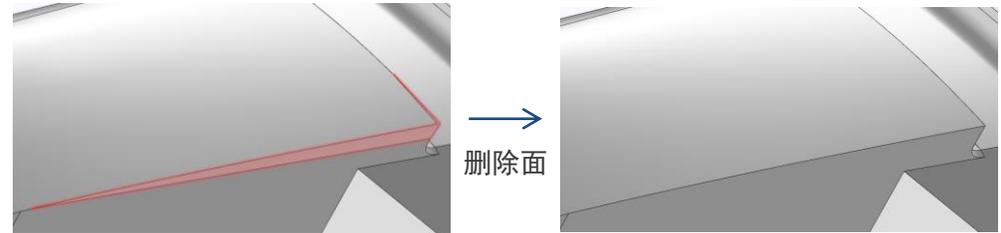


愈合间隙创建实体



# 检查特征

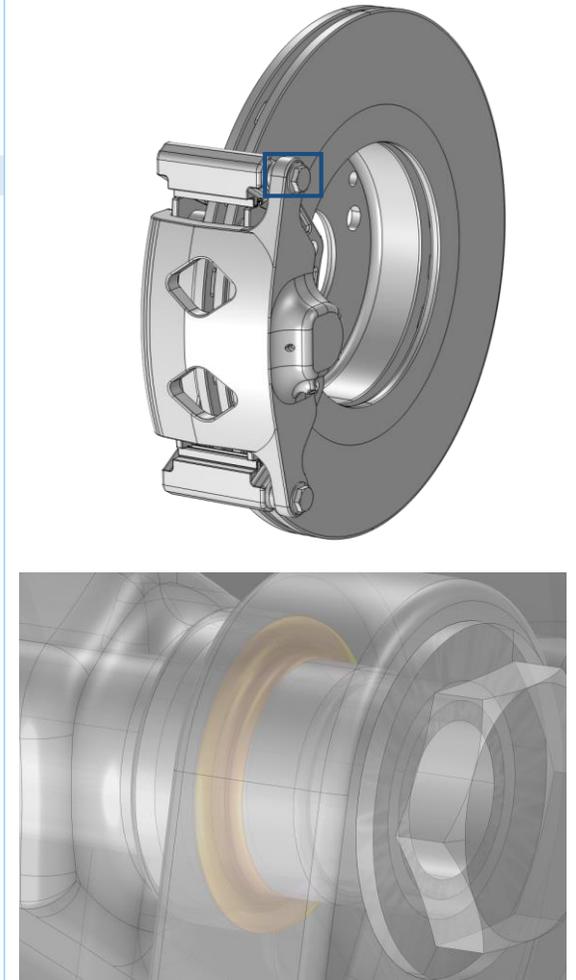
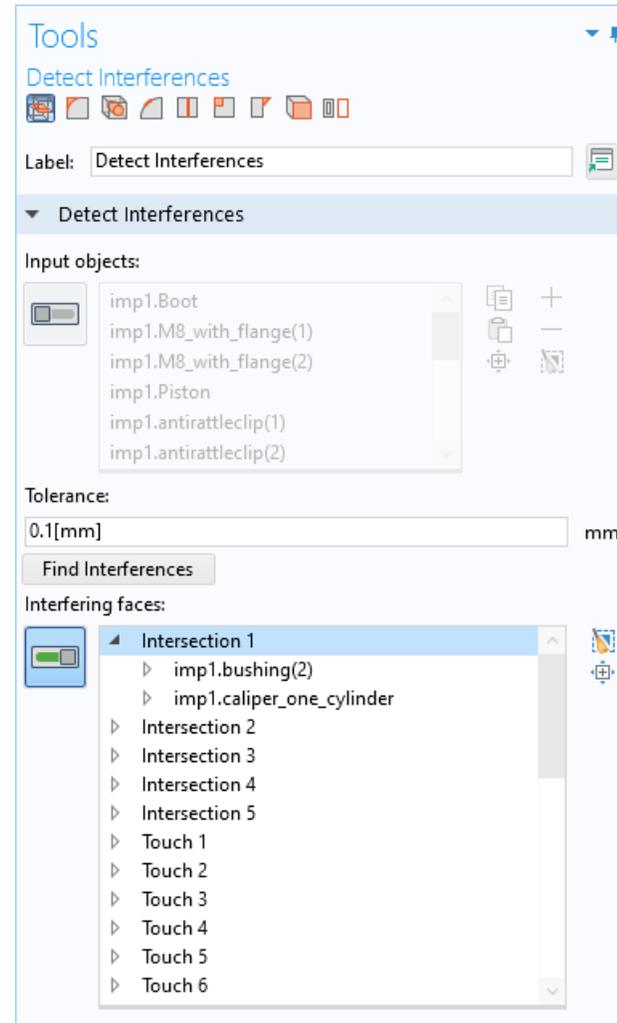
- 检查几何对象的有效性
- 类似于导入和修复的检查功能
- 例如，用以确认更换有缺陷的面后没有遗留问题



使用“删除面”操作替换有缺陷的面后，此几何图形中不会保留任何错误

# 检测干涉

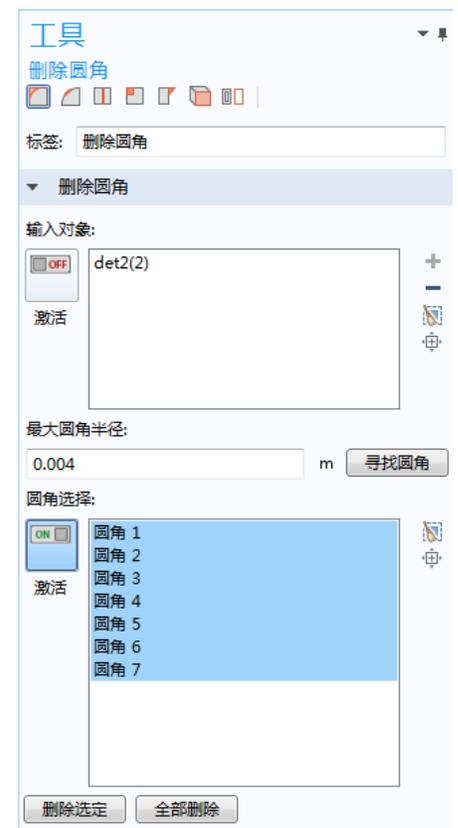
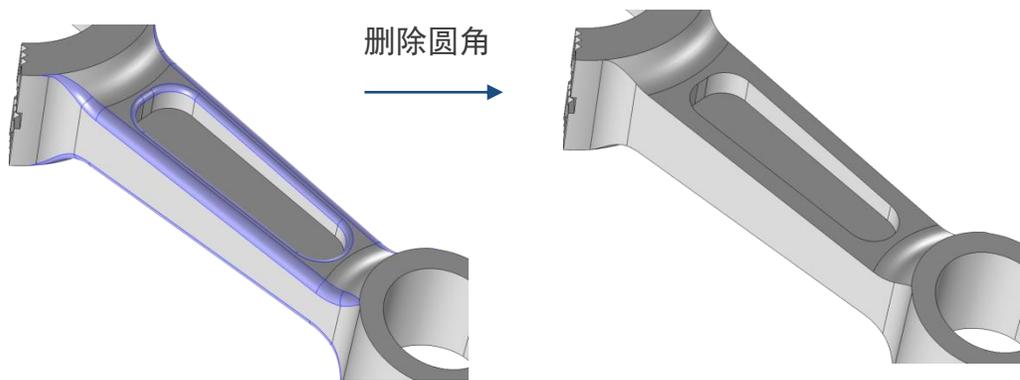
- 用于检测几何对象之间的相交、接触和间隙的工具
- 列出干涉面，并可以在图形窗口中查看
- 对于导入的 CAD 部件很有用



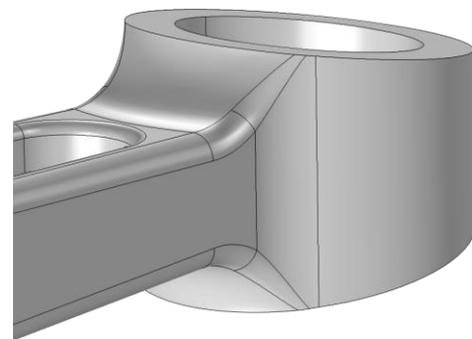
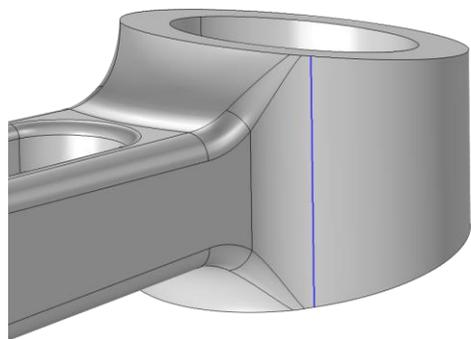
# 修复工具

## 交互式搜索和删除

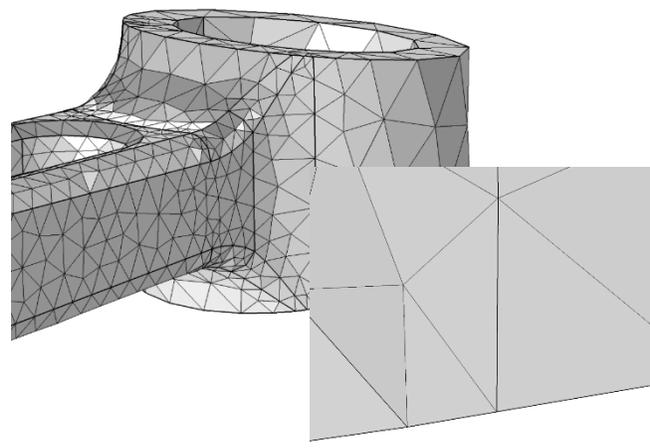
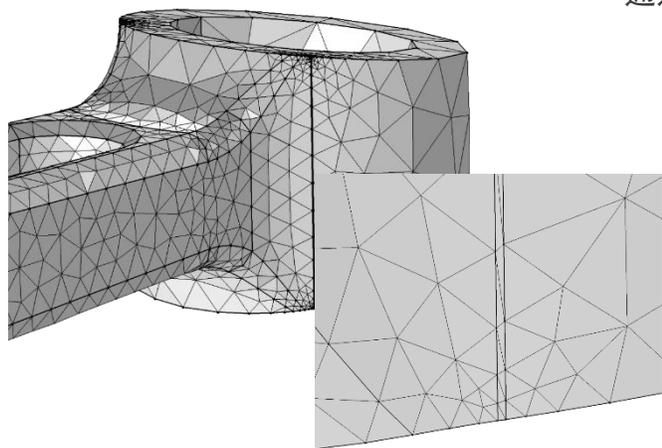
- 圆角
- 短边
- 长条面
- 小面
- 尖端



# 删除长条面



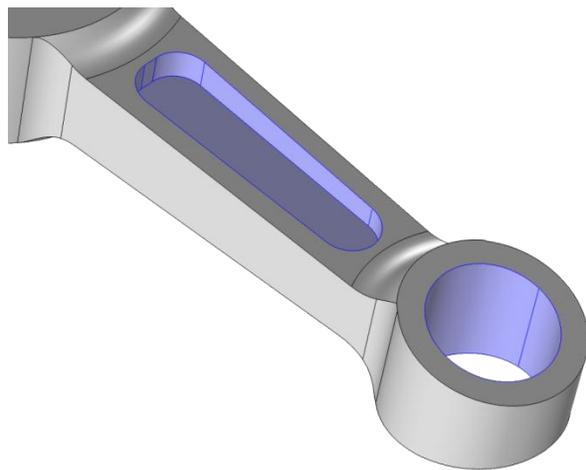
通过折叠为一条边来删除面



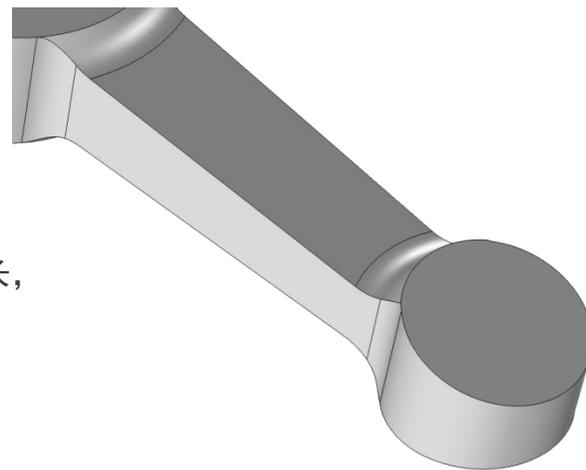
# 删除面

## 选择要删除的面

- 用于删除小孔
- 用于从几何中删除较大的特征

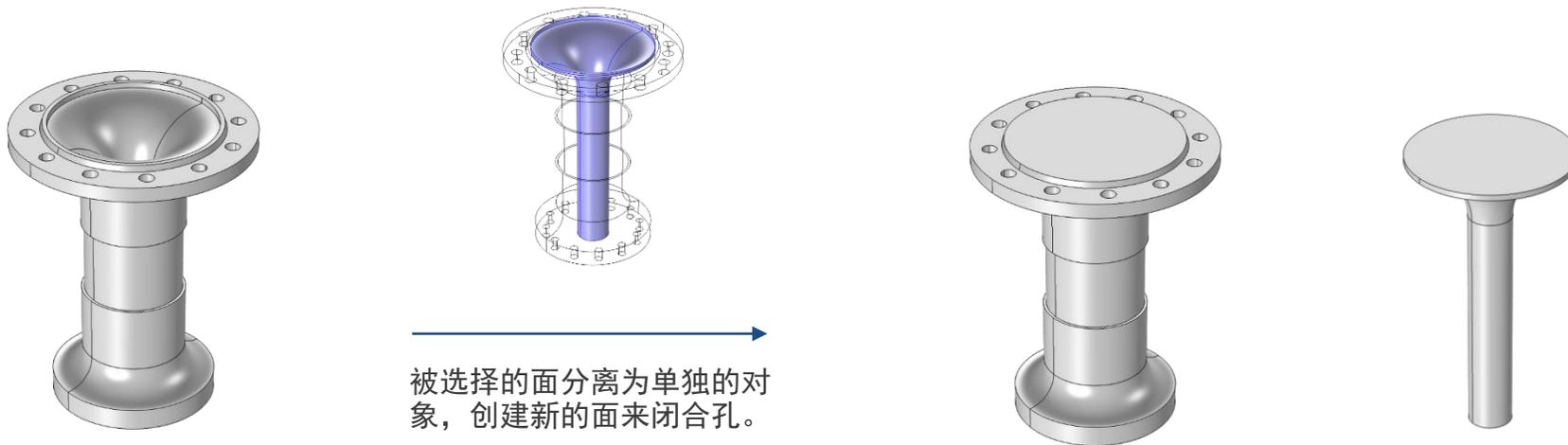


删除面，周围的面自动生长，  
填充缺失部分



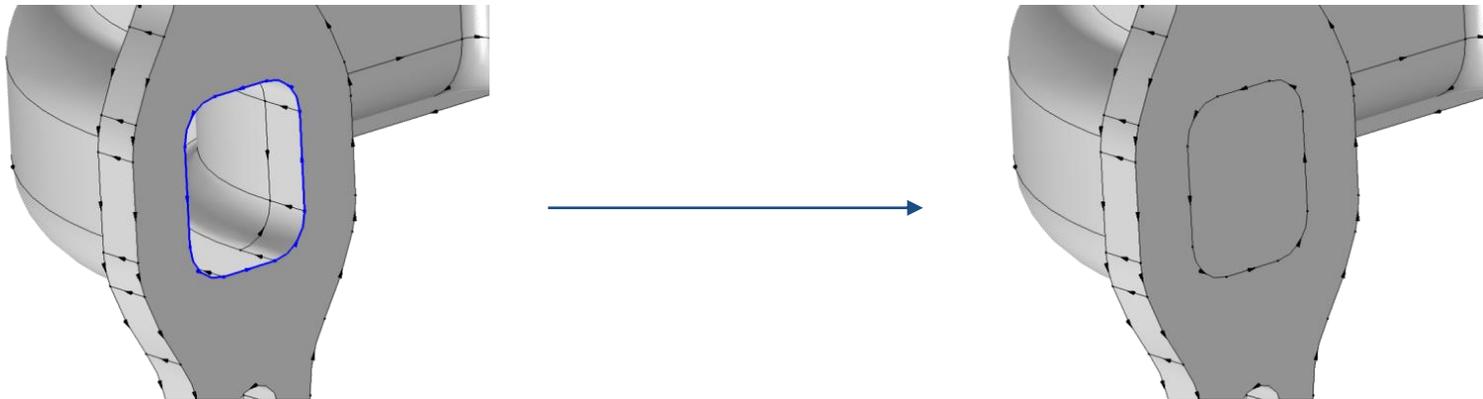
# 分离面

- 选择要分离成一个新实体对象的面
- 用于创建一个在通道或孔中进行流体计算的实体
- 用于创建一个应用不同材料的域



# 端盖面

- 选择在实体或面对象上的边来形成新的面
- 用于创建一个在通道或孔中进行流体计算的实体
- 用于创建一个应用不同材料的域
- 用于闭合一个面对象并创建一个实体

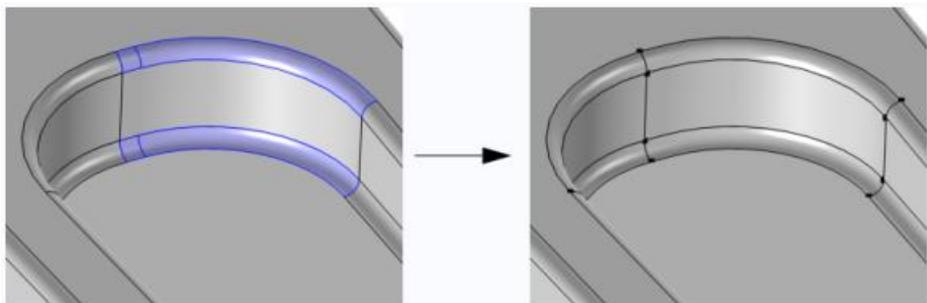


# 虚拟操作

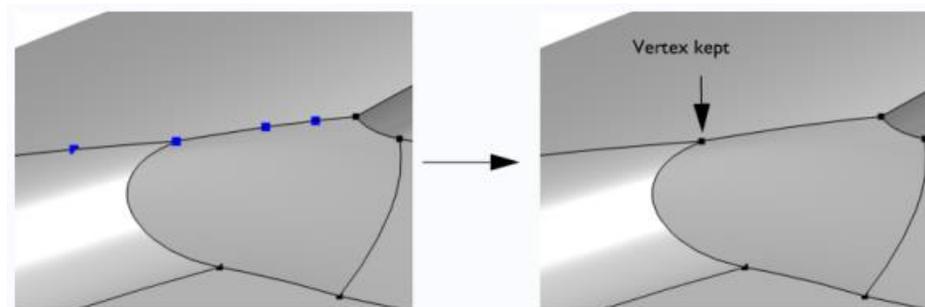
- 虚拟几何和网格控制
- 用于几何形成联合/装配之后的几何操作
- 更底层的 CAD 操作
- 为了更好地进行网格剖分



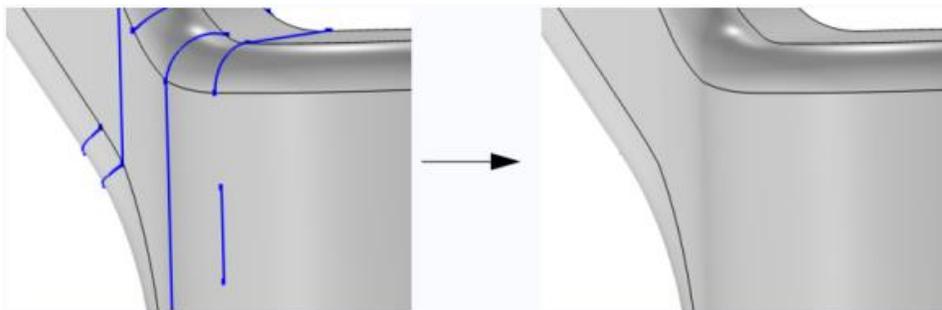
# 虚拟几何操作



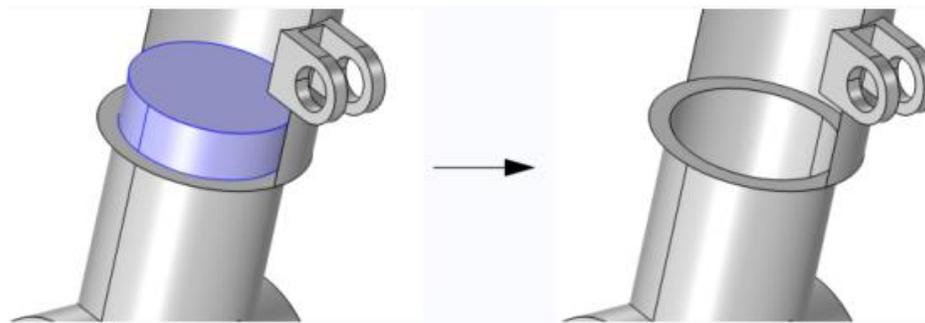
形成复合面



忽略顶点

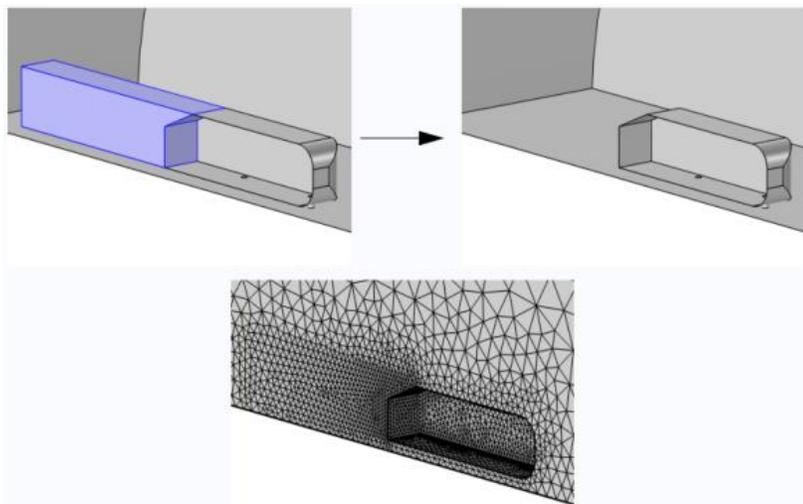


忽略边

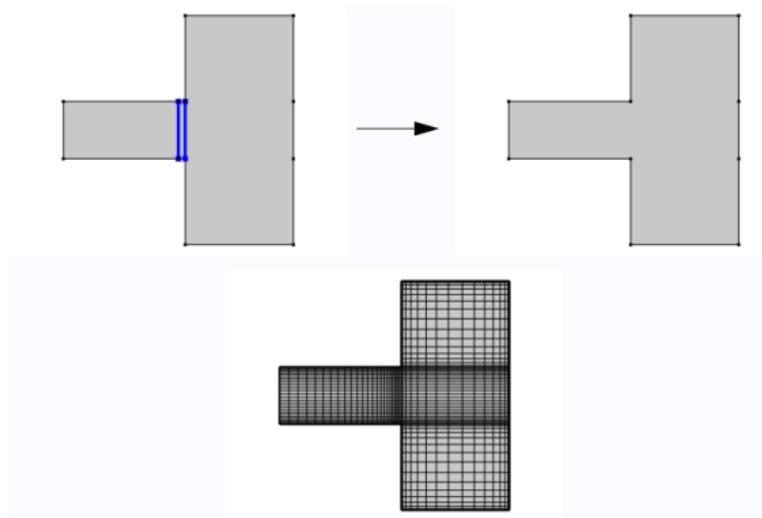


删除面

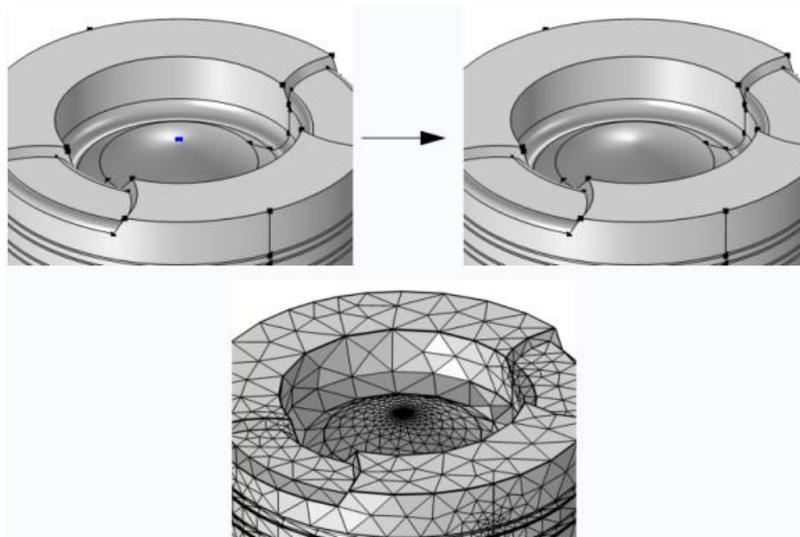
# 网格控制操作



网格控制域



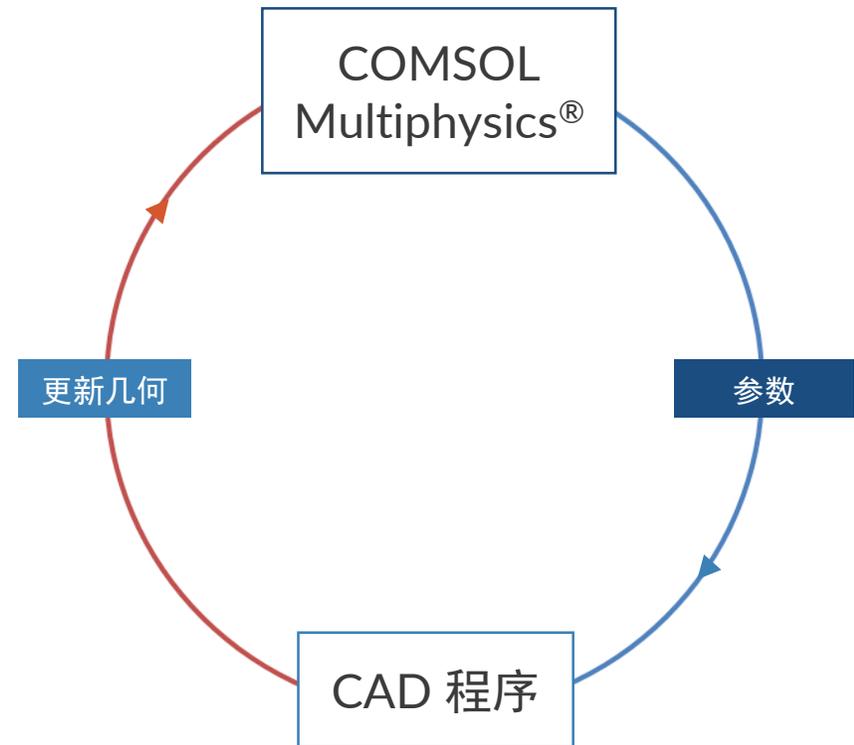
网格控制边



网格控制点

# LiveLink™ 接口

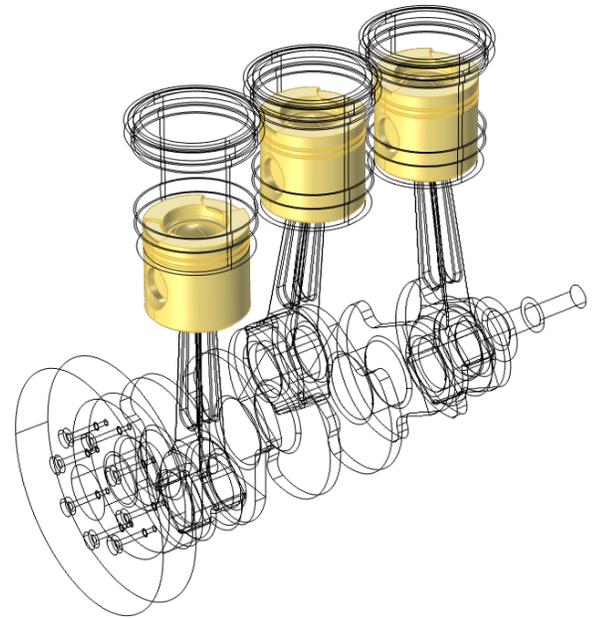
- CAD 软件和 COMSOL Multiphysics® 软件间同步更新设计的双向接口
- 向 CAD 软件传递参数来更改设计
- 将几何关联传递至 COMSOL Multiphysics
- 由 COMSOL Multiphysics 发起同步指令



# 选择

- 通过选择指定材料性质，定义边界条件，划分几何体网格时
- 根据同步的 CAD 几何模型的材质定义自动创建选择
- 自定义选择<sup>1</sup>包含：
  - 装配部件
  - 模型特征
  - 选择域/面实体、面、边等

Name
4032-T6
AISI 1035 Steel (SS)
AISI 4130 Steel, normalized at 870C
Ductile Iron



<sup>1</sup>LiveLink™ for Inventor®, LiveLink™ for SOLIDWORKS®

# LiveLink™ 接口与 CAD 导入

功能	CAD 导入	LiveLink™ 接口
导入几何模型	✓	✓
关联性导入		✓
自动选择		✓
消除和修复	✓	✓*
虚拟几何操作	✓	✓
几何参数化扫描		✓
几何参数化优化		✓**

✓\* 可以实现，但一些关联性会丢失

✓\*\* 需要优化模块授权