

---

# 利用ANSYS透平工具 进行涡轮增压器的设计和分析

IDAJ-China 技术部

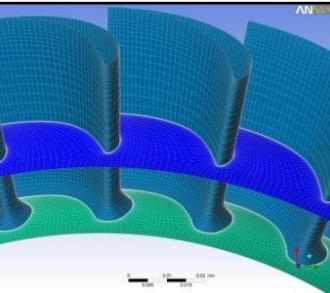
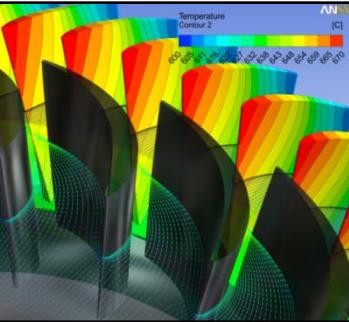
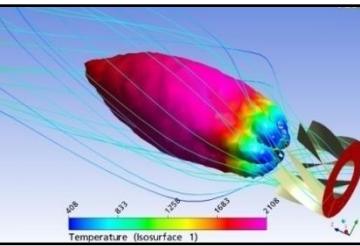
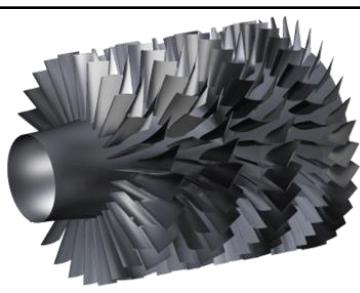


# 主要内容

---

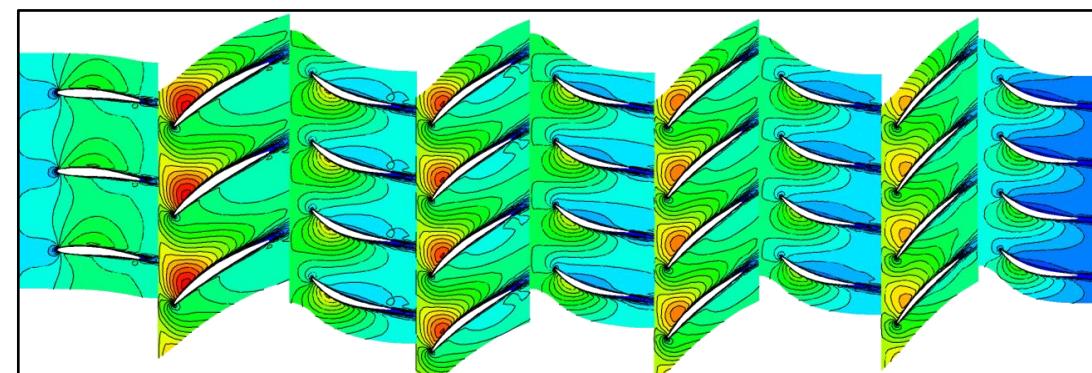
- ANSYS 在旋转机械领域内的应用
- 涡轮增压器的原理和结构类型
- ANSYS 进行涡轮增压器设计分析系统
- 涡轮增压器分析典例
- 总结

# ANSYS 在旋转机械领域内的应用



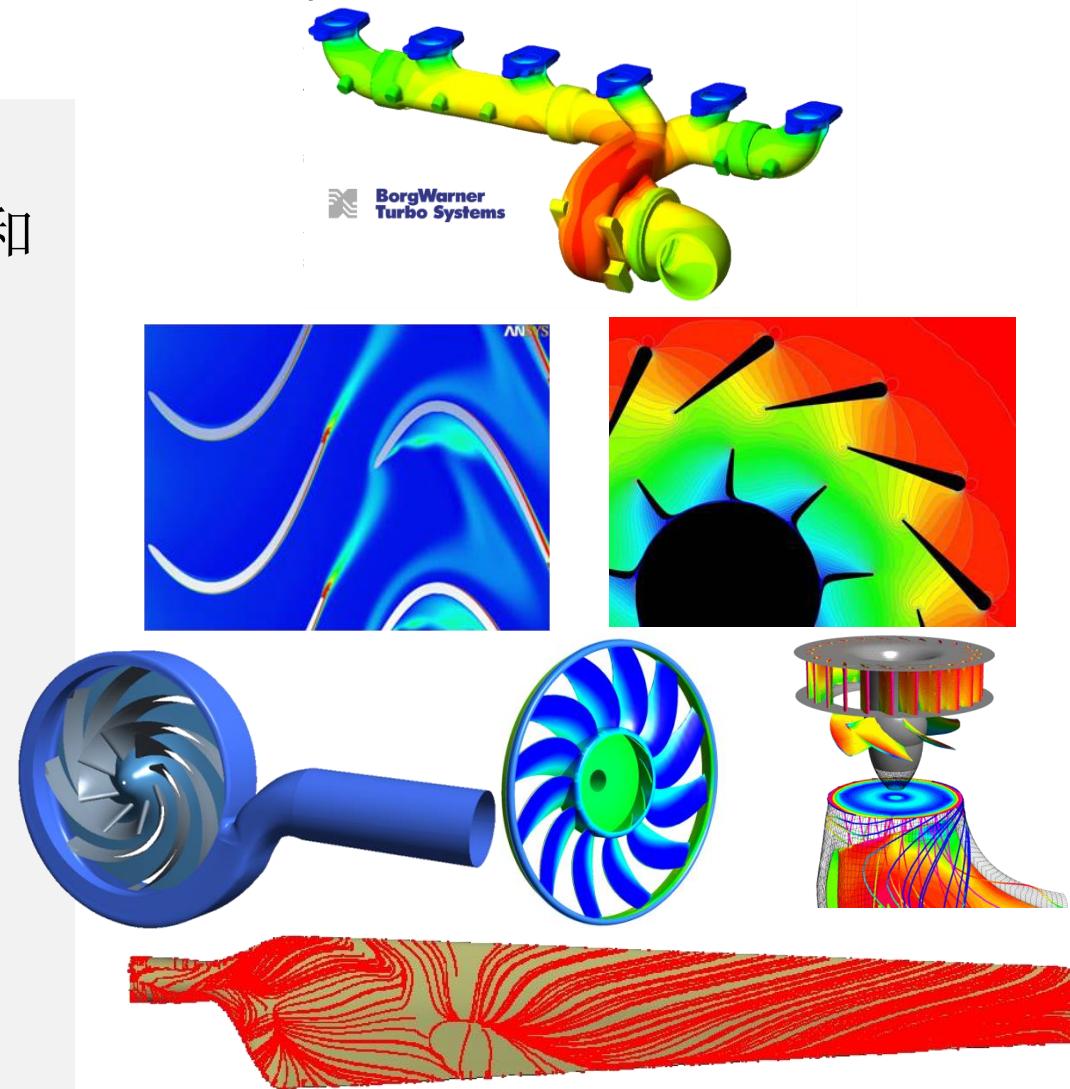
## 整机模拟

- 全部件的高精度模拟
- 复杂现象和复杂过程的模拟
  - ✓ 燃烧不稳定性、压气机失速、空化、噪声、疲劳、部件干涉、先进材料
- 适用于多尺度和多物理场耦合
- 高性能大规模并行计算



# ANSYS 在旋转机械领域内的应用

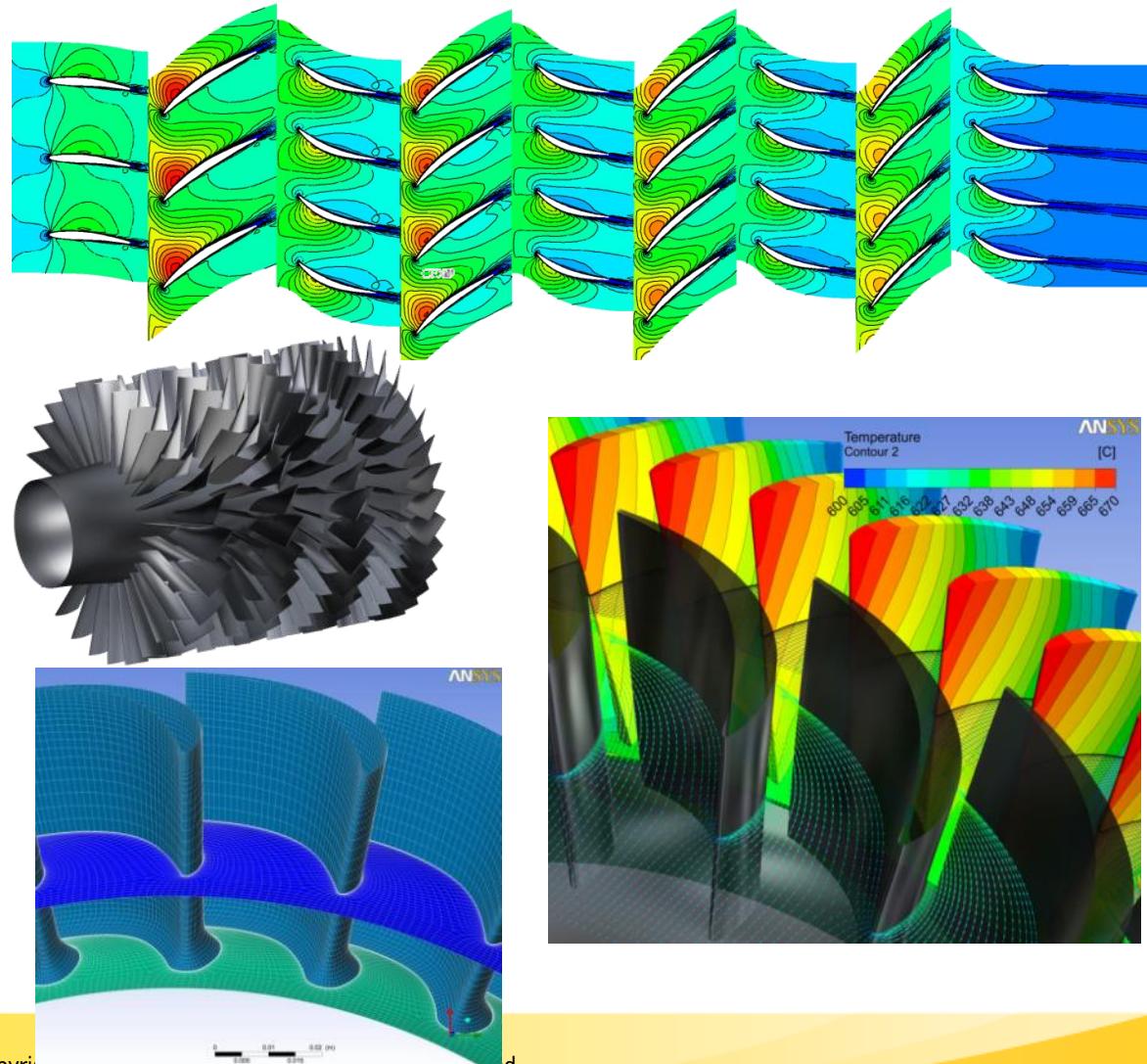
- 轴流和离心压气机
- 轴流和径流透平机（气和蒸汽）
- 离心、混流和轴流泵
- 轴流和径流风扇
- 汽车行业内的透平机械
- 水轮机
- 风力机



# ANSYS 的透平设计分析系统

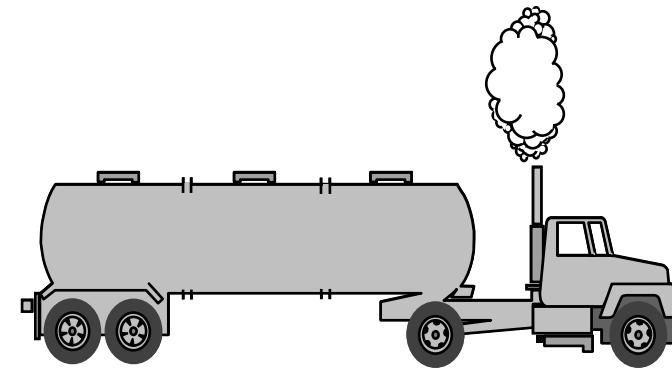
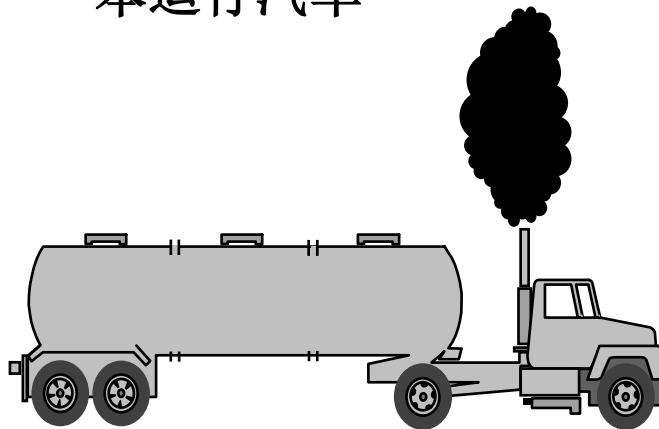
## ■ 在ANSYS Workbench 平台上进行完整透平机械的设计和分析

- 几何建模
- 通流分析
- 网格划分
- 计算流体动力学分析
- 热力学分析
- 燃烧模拟
- 结构力学仿真
- 转子动力学模拟
- 结果后处理
- 优化



# 涡轮增压器的原理和设计要求

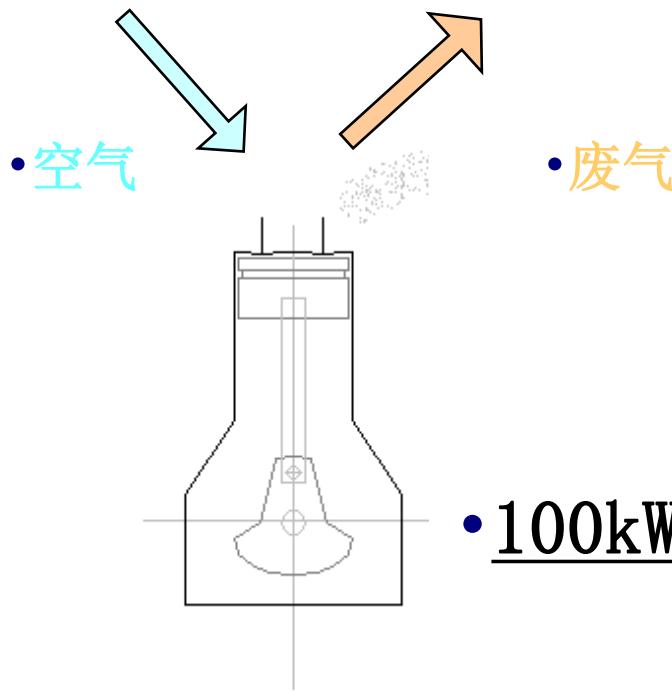
- 汽车工业中涡轮增压器的使用日益增长，增长的动力来自于：
  - 日益苛刻的国家排放标准（国Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ，国Ⅵ即将发布）
  - 提高发动机的功率和扭矩，保证燃油汽车燃油经济性，开发低成本运行汽车



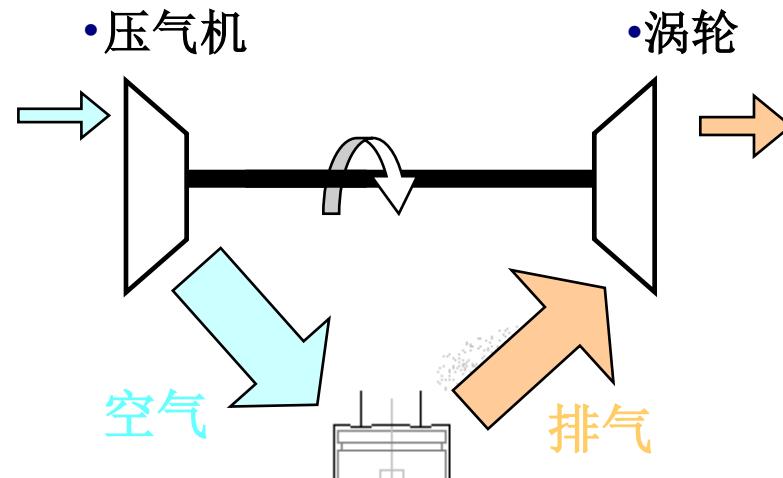
- 涡轮增压器是实现上述目标的重要途径之一
- Honeywell公司曾预测到2025年70%的常规动力汽车将安装涡轮增压器

# 涡轮增压器的原理和设计要求

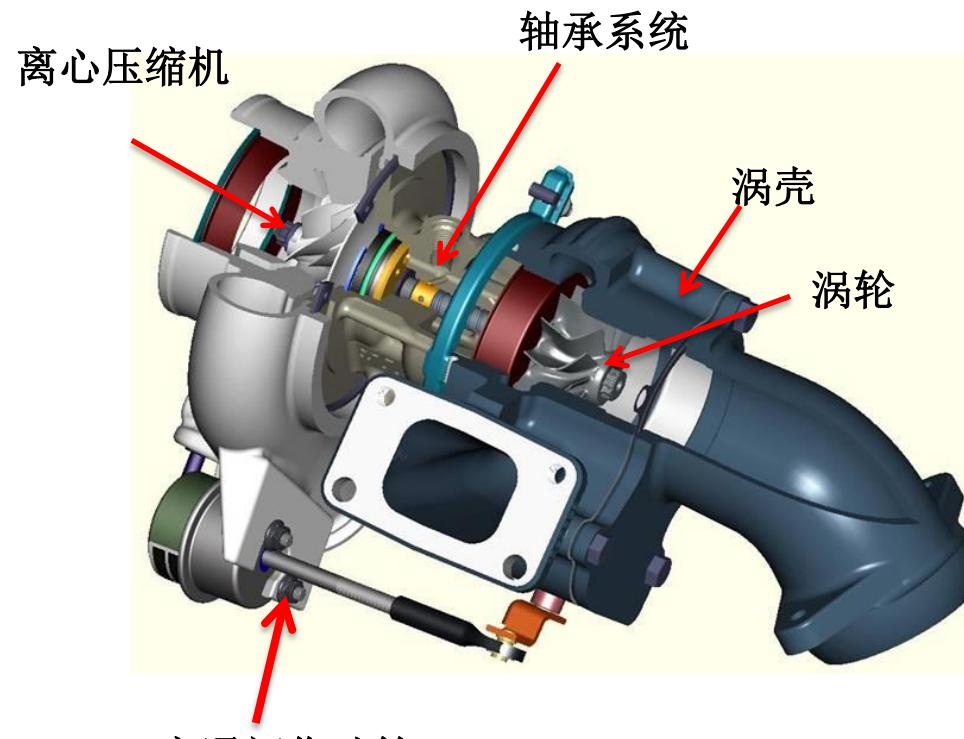
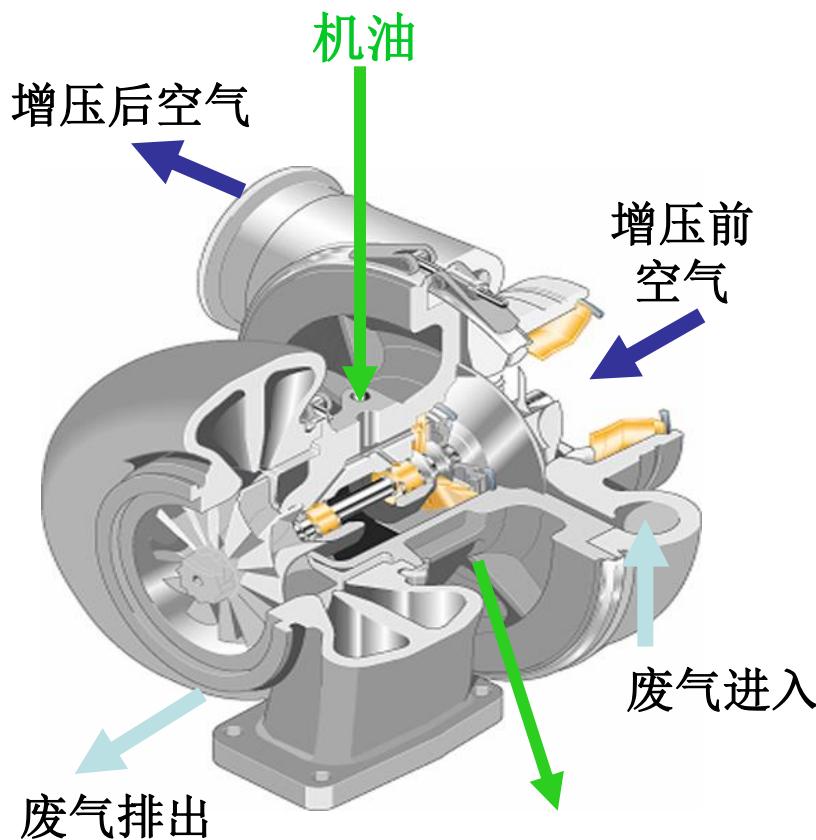
- 自然吸气



- 涡轮增压

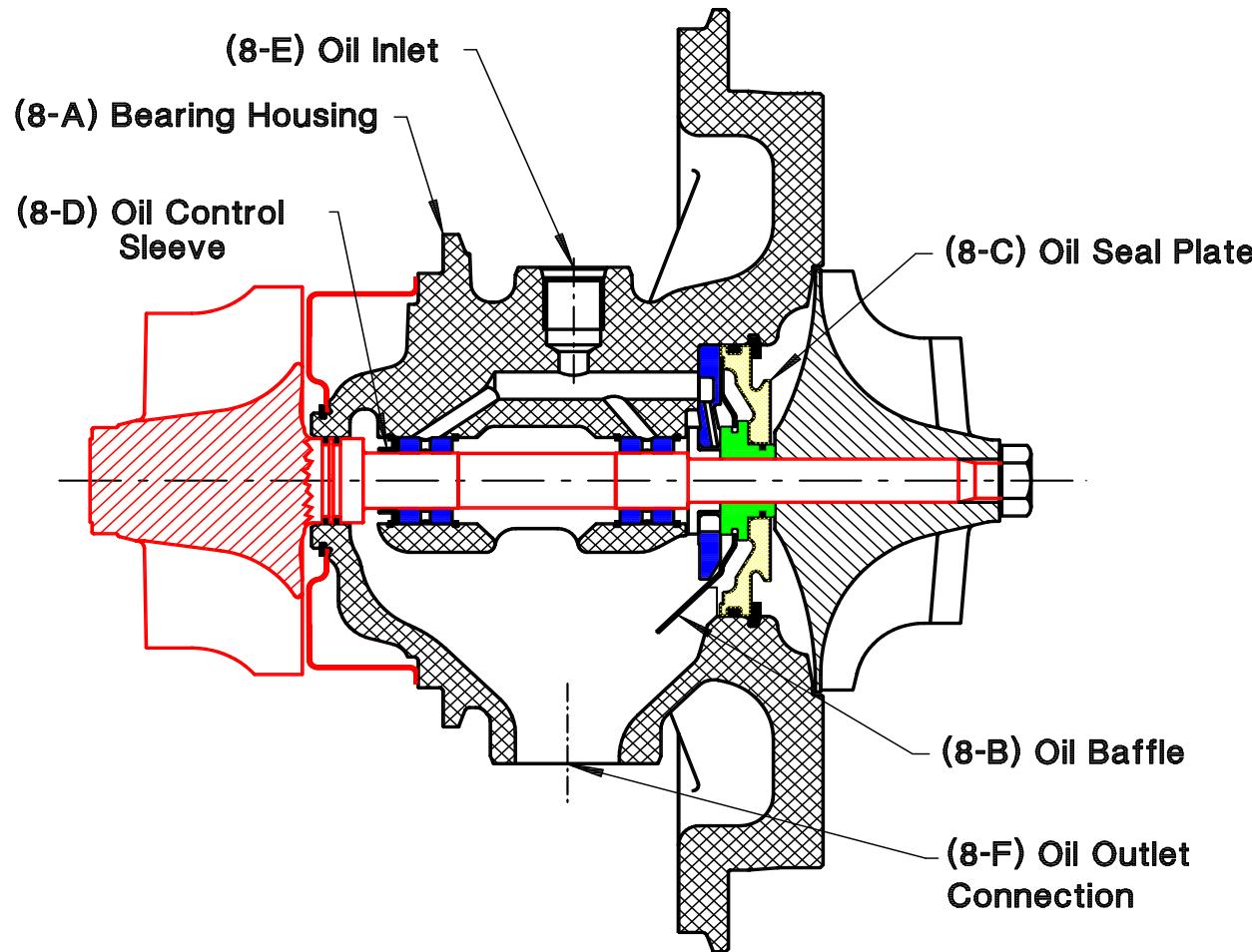


# 涡轮增压器的原理和设计要求

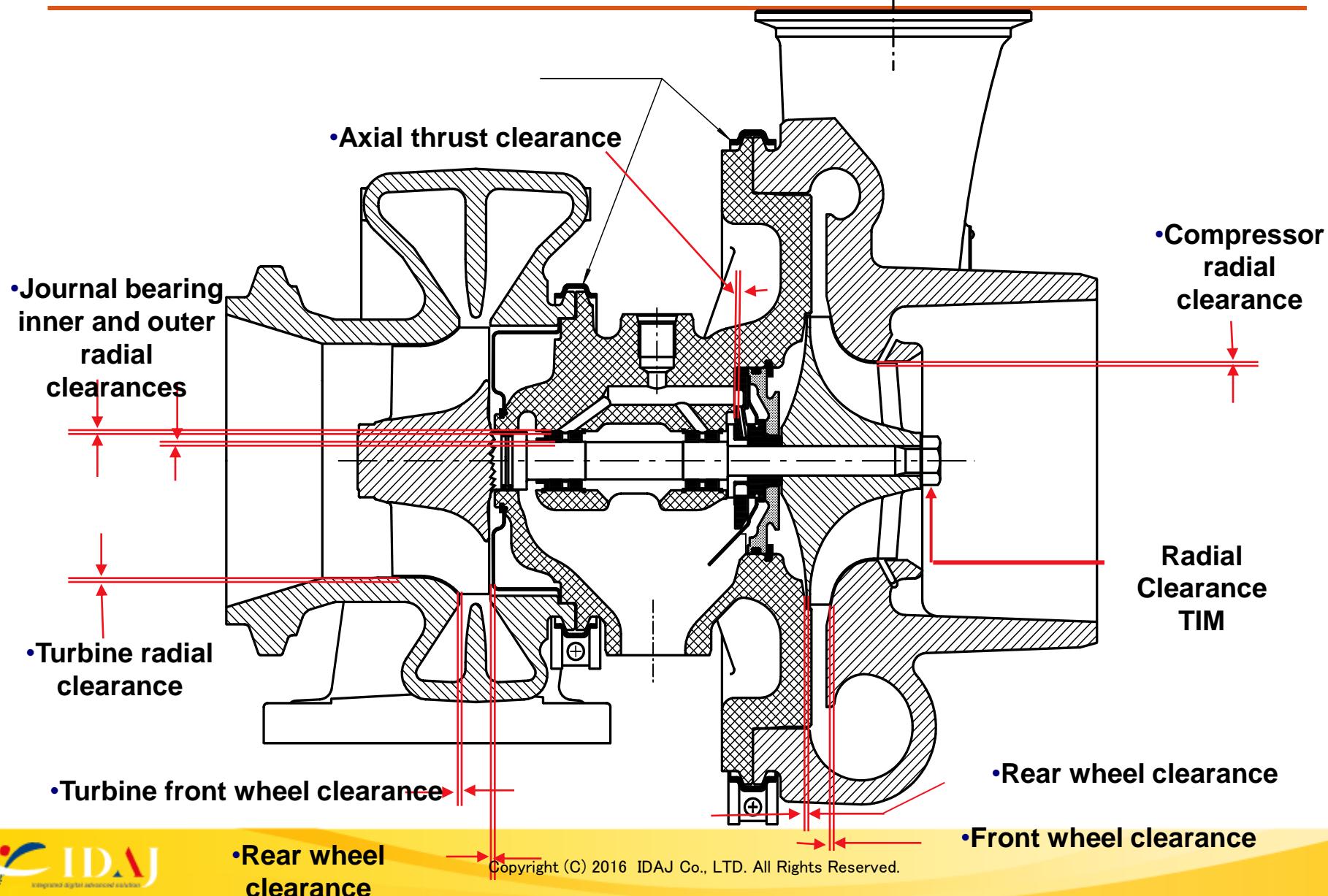


• 压气机内的温度可达200° 涡轮工作温度可达760°

# 涡轮增压器的原理和设计要求



# 涡轮增压器的原理和设计要求



# 涡轮增压器的原理和设计要求

■ 涡轮增压器发展趋势：性能高效稳定、工作范围宽、结构紧凑（34mm）、成本低且耐用

- 双涡轮增压：串联一大一小两只涡轮或并联两只同样的涡轮，在发动机低转速的时候，较少的排气即可驱动涡轮高速旋转以产生足够的进气压力，减小涡轮迟滞效应；
- 可变截面涡轮增压器：旋转喷嘴环叶片调节涡轮有效流通截面积和流通特性，在涡轮流速比、增压器工作效率等方面明显优于其它型式的可变截面涡轮增压器，是目前最常用可变截面结型式；
- 废气旁通增压器：高速高负荷时，旁通阀打开，放掉一部分废气，以降低增压器转速，控制压比；
- 电辅助涡轮增压器：利用电能来提高涡轮增压器转子的加速性,还可依靠发电机回收能量。

# 涡轮增压器的原理和设计要求

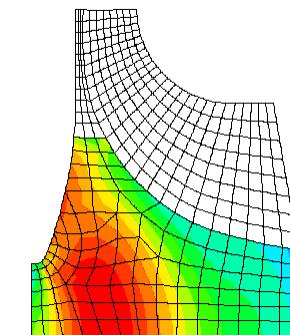
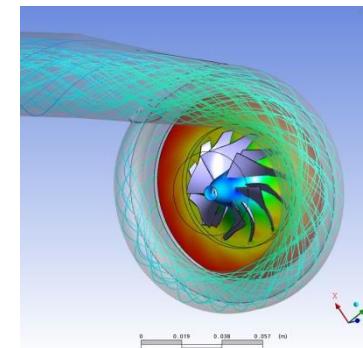
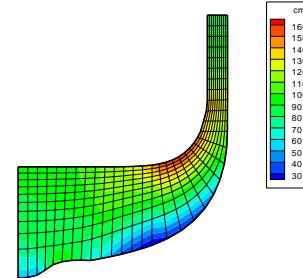
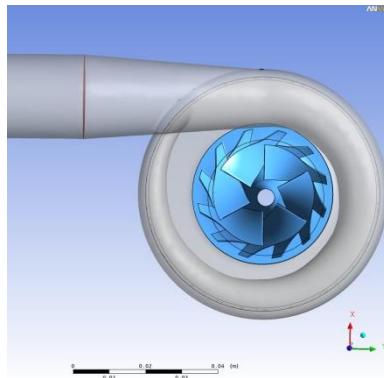
## ■ 涡轮增压器多学科设计优化涉及的关键技术

- 涡轮增压器几何参数化造型设计
- 涡轮增压器多学科分析方法
  - 流场分析和传热分析
  - 结构强度分析和流固耦合分析
  - 转子动力学分析
- 效率与精度的权衡策略
- 多学科并行优化设计方法
  - 多种设计因素 相互制约, 需要平衡
  - 涡轮增压器应用广泛, 优化准则变化大, 不可能“一准则走天下”

实现上述关键技术必须构建多学科多物理场的计算仿真平台（套装软件）

# 涡轮增压器的原理和设计要求

## ■ 多学科多物理场的计算仿真平台的具体要求

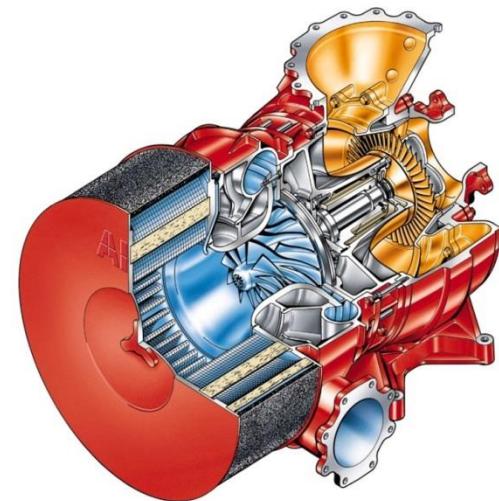
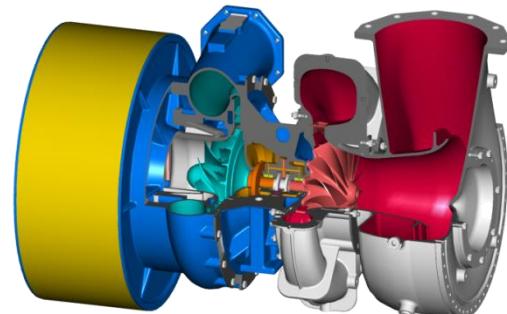


- 具有CAD功能
- 叶轮/转子和涡壳的专业几何建模工具
- 一维的气动力设计工具
- 二维的气动力分析工具

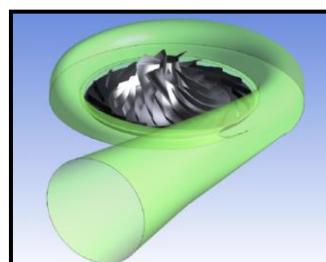
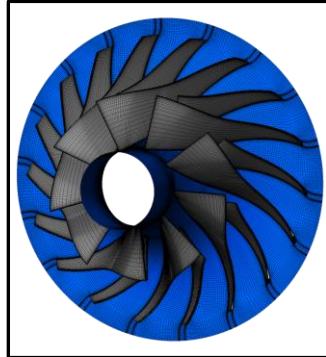
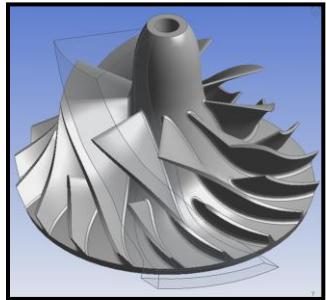
- 三维稳态和非稳态 CFD 仿真
- 自动化前/后处理
- 模态分析
- 应力和热分析
- 多学科、多物理场之间的数据自动交换

---

- ANSYS 进行涡轮增压器设计分析系统



# 多学科多物理场的计算仿真平台的主要构成模块和工作流程



◆ 现有设计或基于一维设计的基本模型

◆ 叶轮/转子 形状

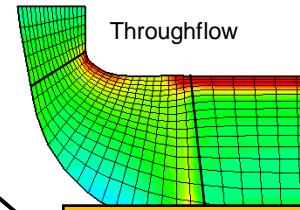
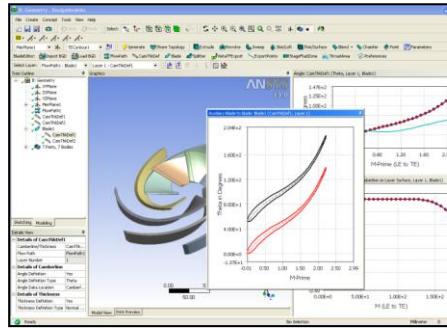
◆ 通流分析 (2D)

◆ 3D 网格生成

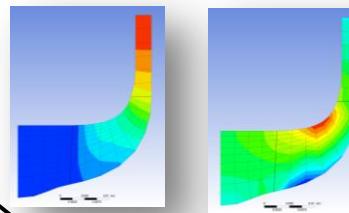
◆ 3D 转子 CFD分析

◆ 蜗壳几何+ 网格

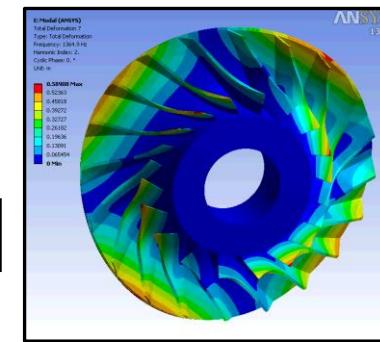
◆ 3D 转子 + 蜗壳 CFD分析



• 模态分析



• 应力分析



• 结果后处理 (定量和定性)

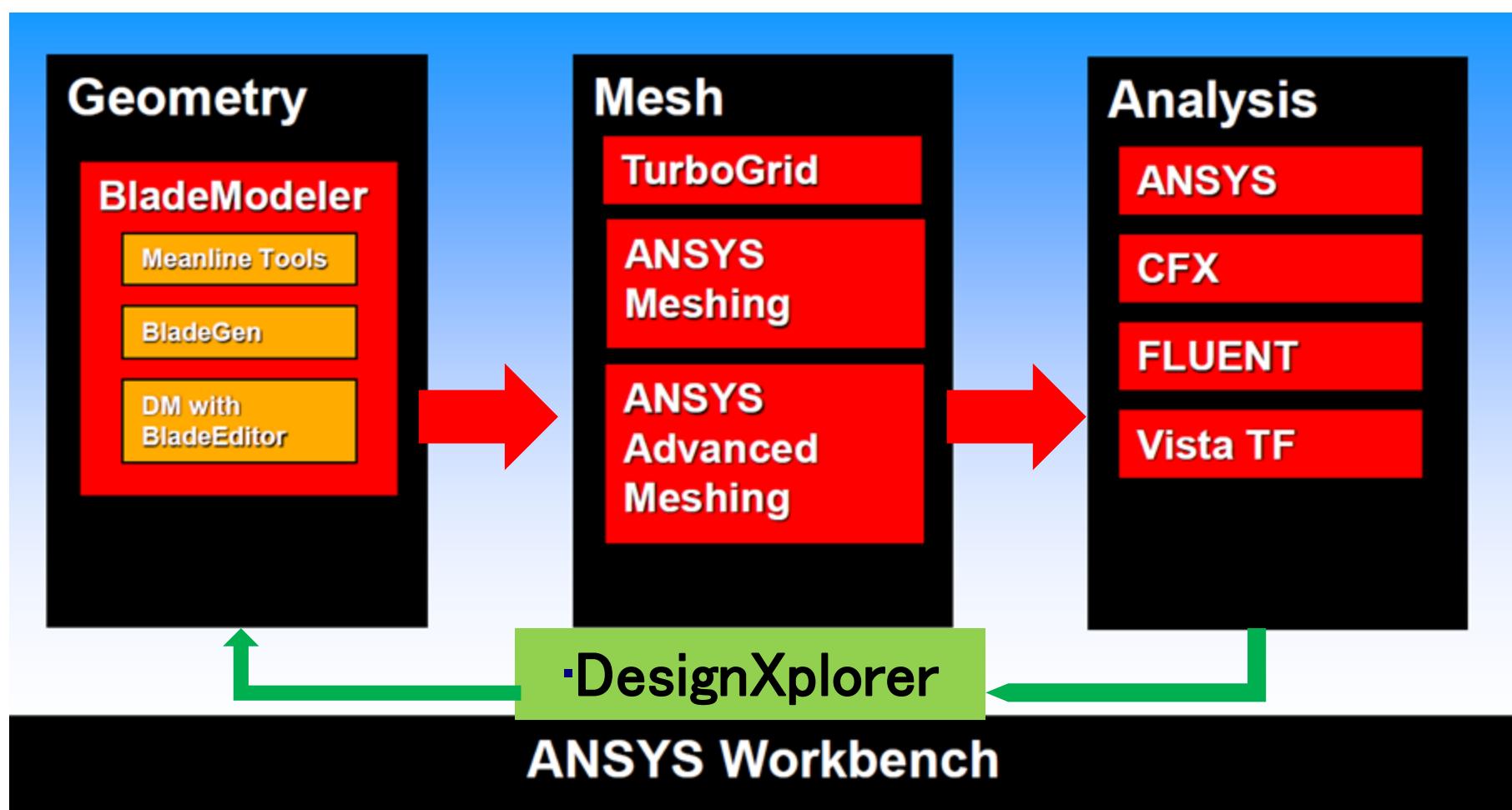
# 1D-2D-3D逐级设计的优势

---

- 基于一维理论的设计和模拟有利于缩短初始设计的周期
- 基于二维理论的数值模拟可以实现快速优化，缩小参数的选择范围，过滤较差的设计方案，得到满足气动力设计标准的叶片
- 基于三维理论的数值模拟可以得到精确的结果，特别是非设计工况下的准确计算。

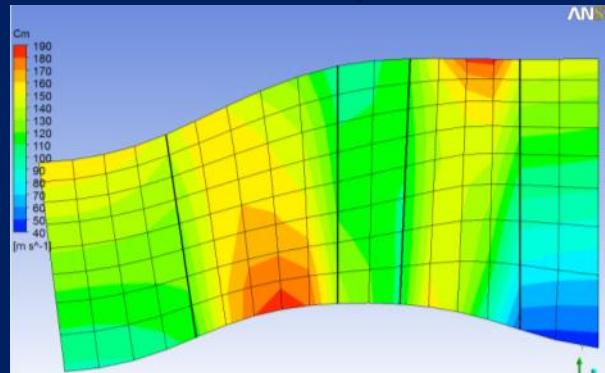
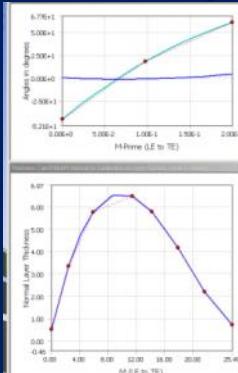
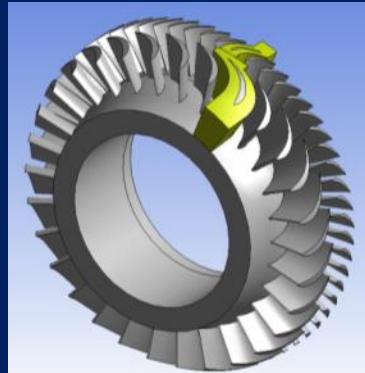
**Simulation provides the power and efficient tools to enable designers to come up with optimal designs. But you still need to know what you are doing.**

# ANSYS提供功能强大的Workbench平台



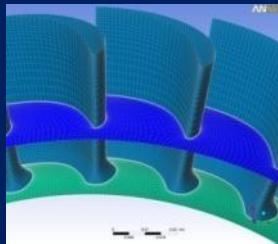
# ANSYS Workbench

- 几何参数化(中弧线和 通流道)

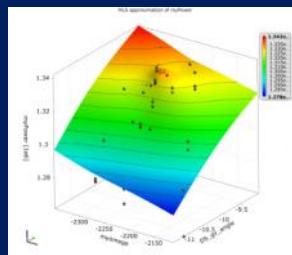
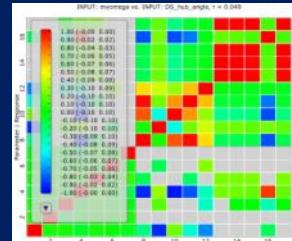


- Vista TF
- 快速分析

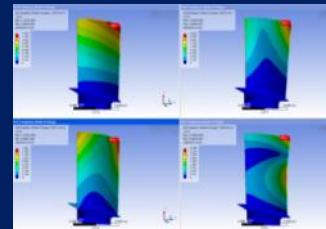
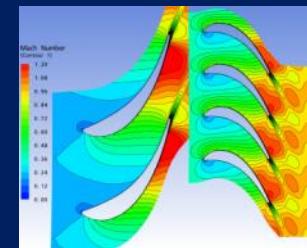
- 网格



- 鲁棒性设计

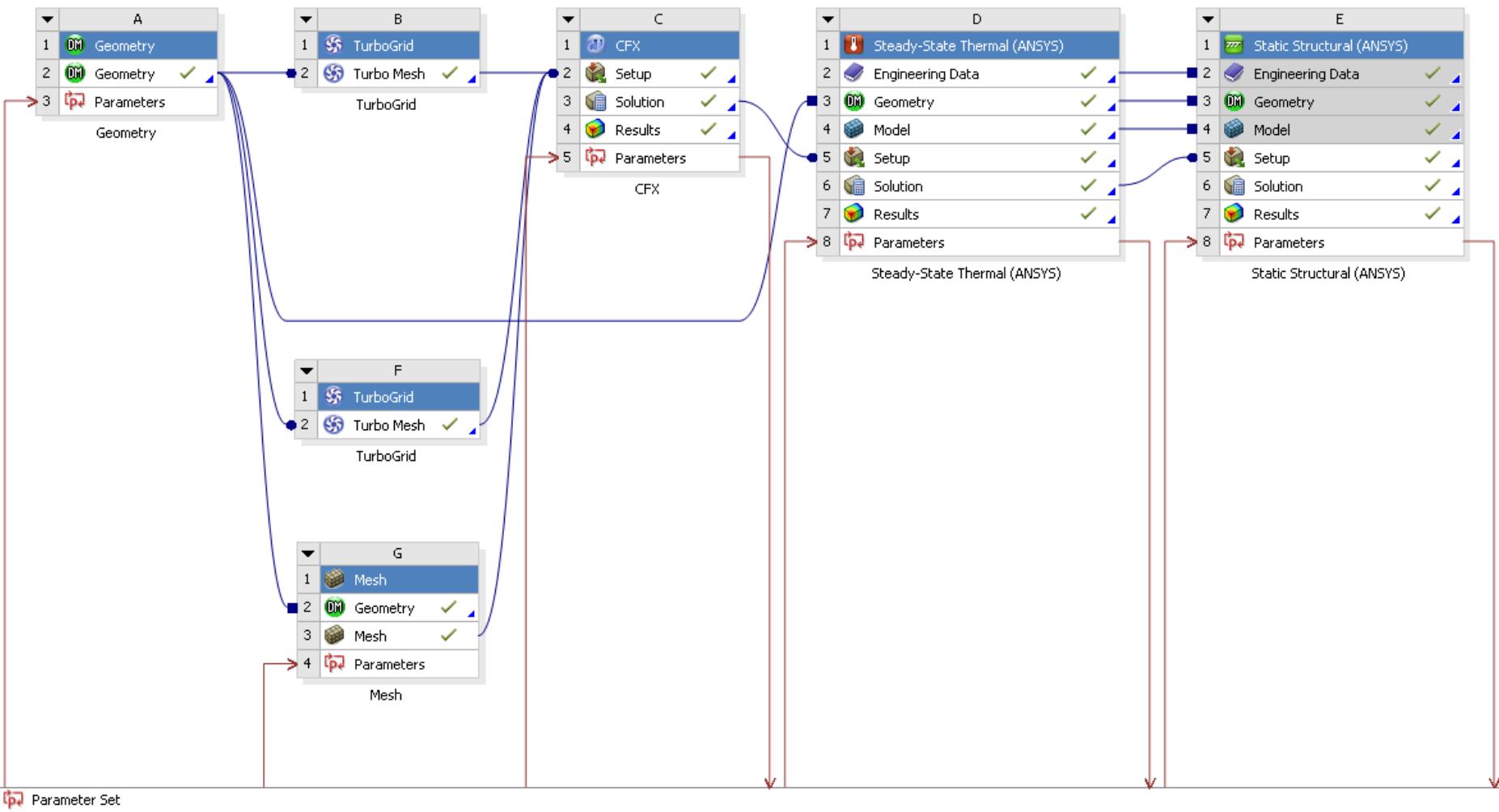


- 分析

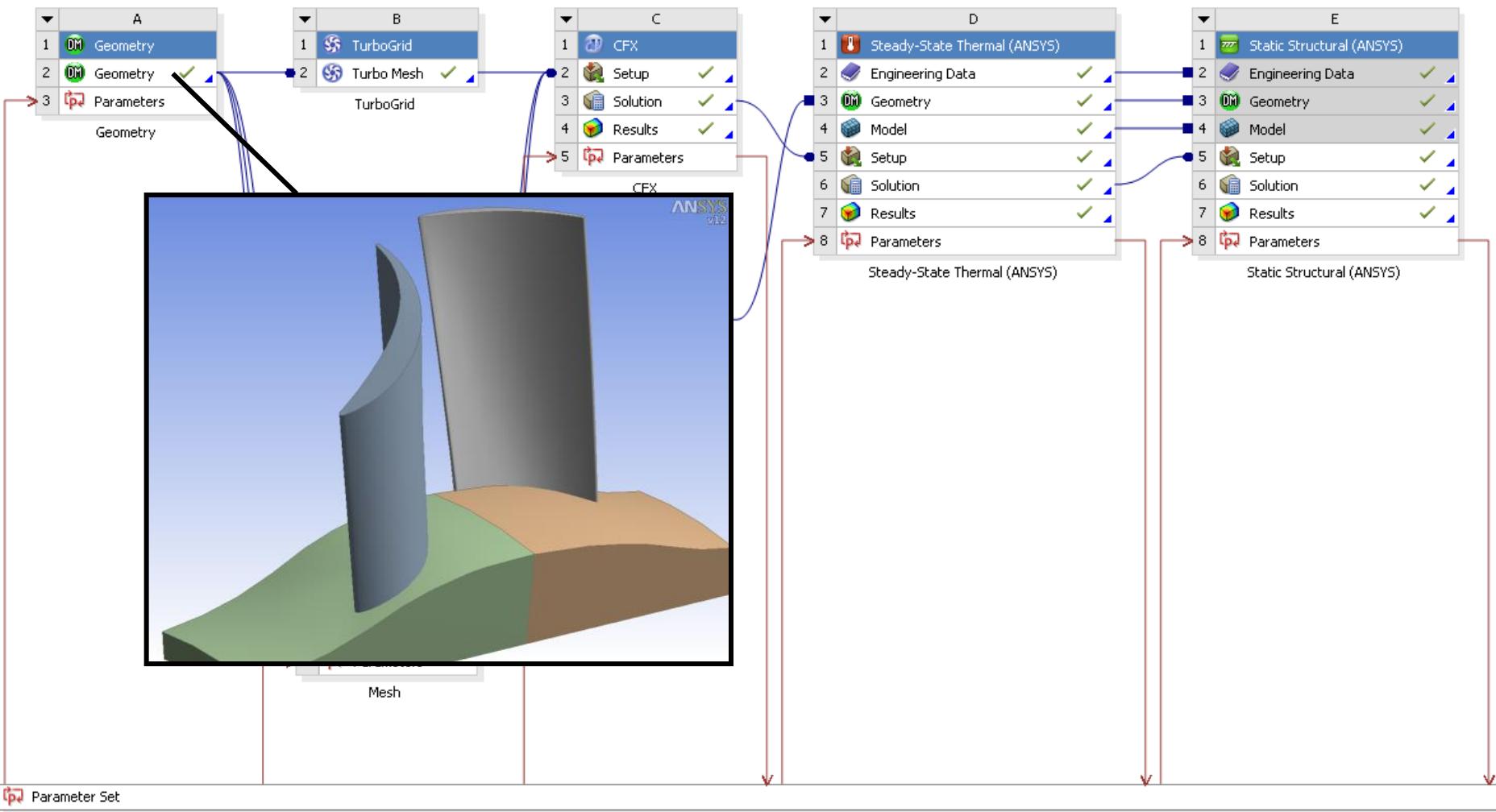


- 三维多物理场分析

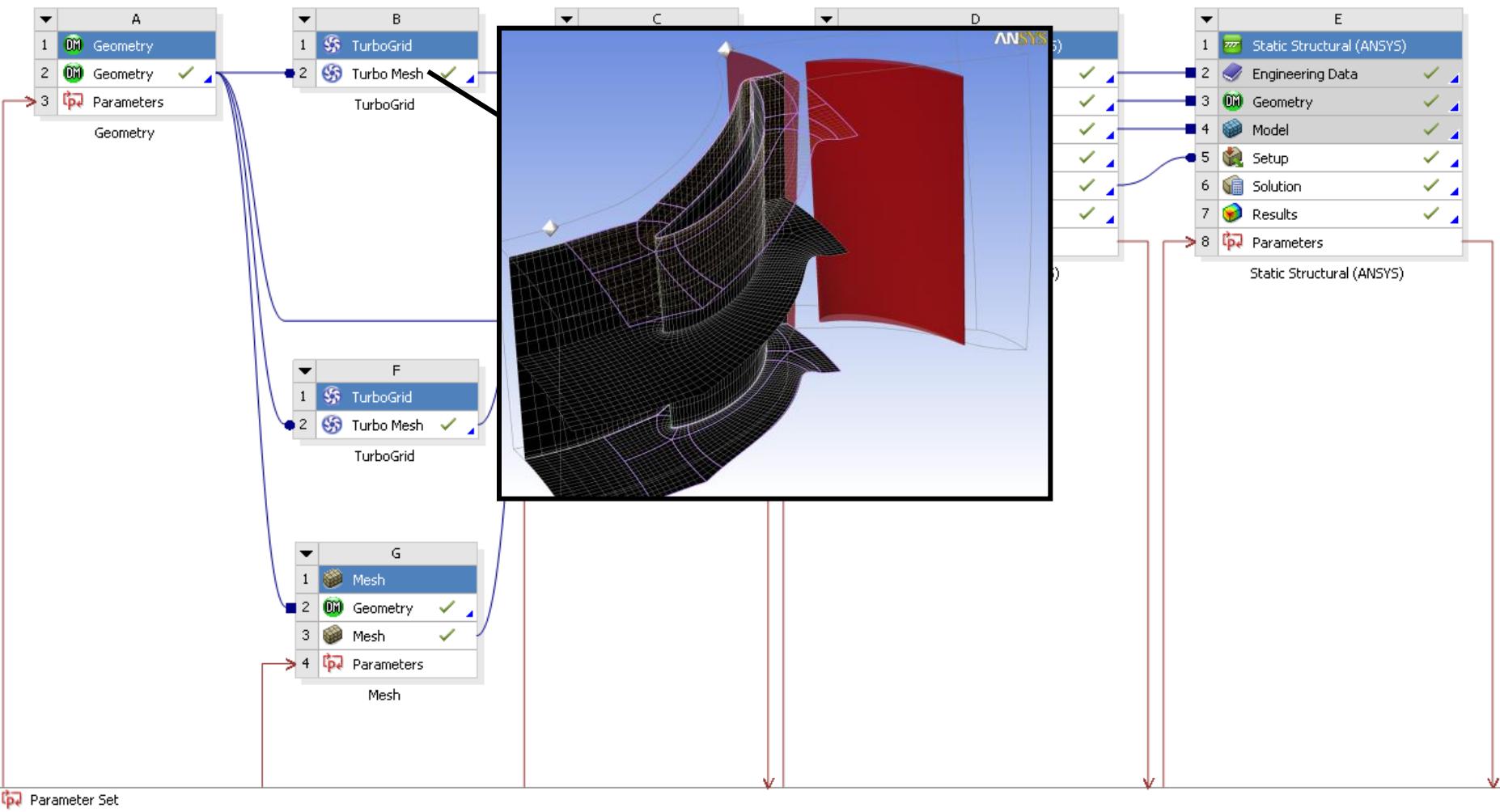
# ANSYS Workbench



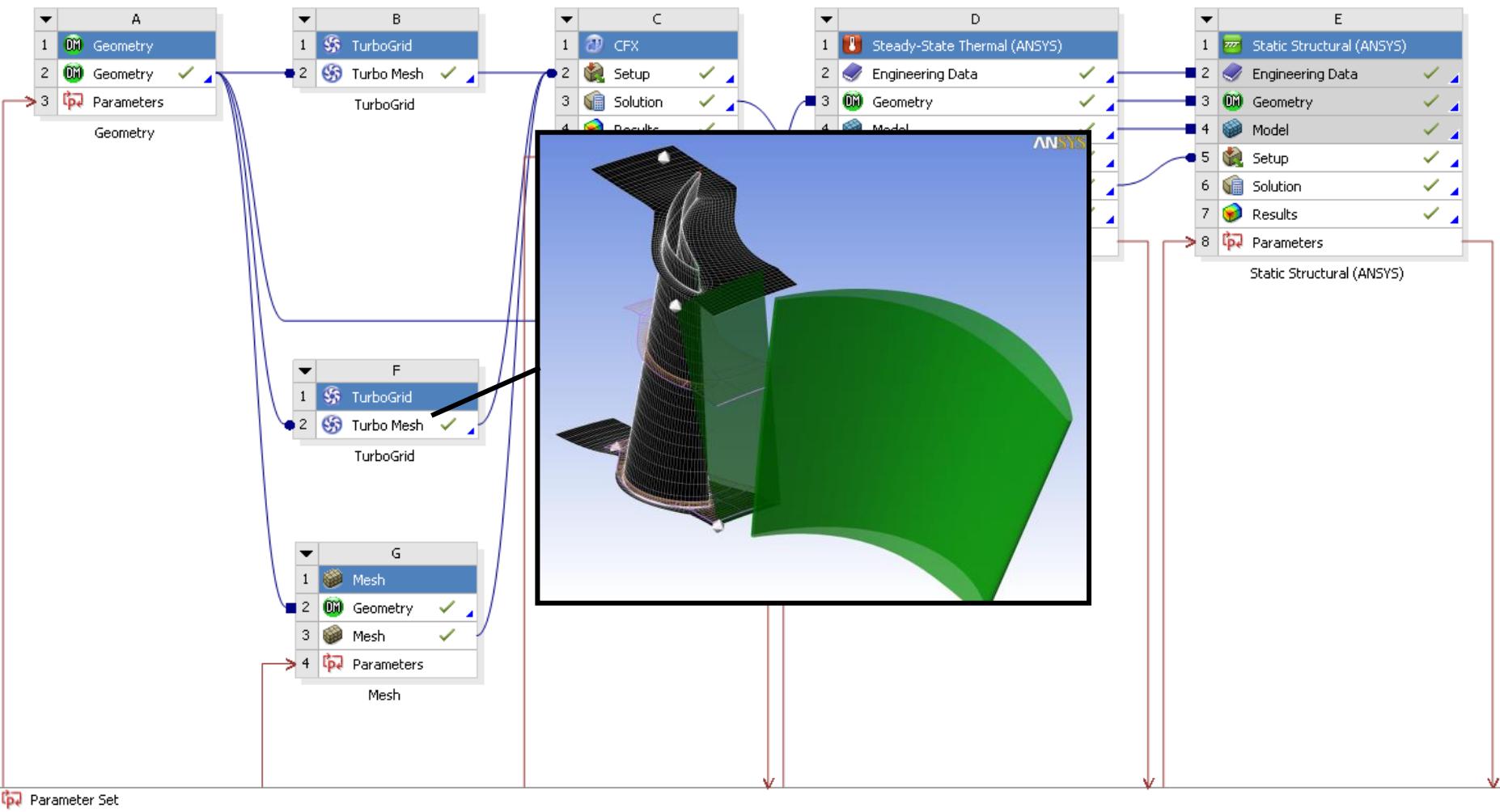
# ANSYS Workbench



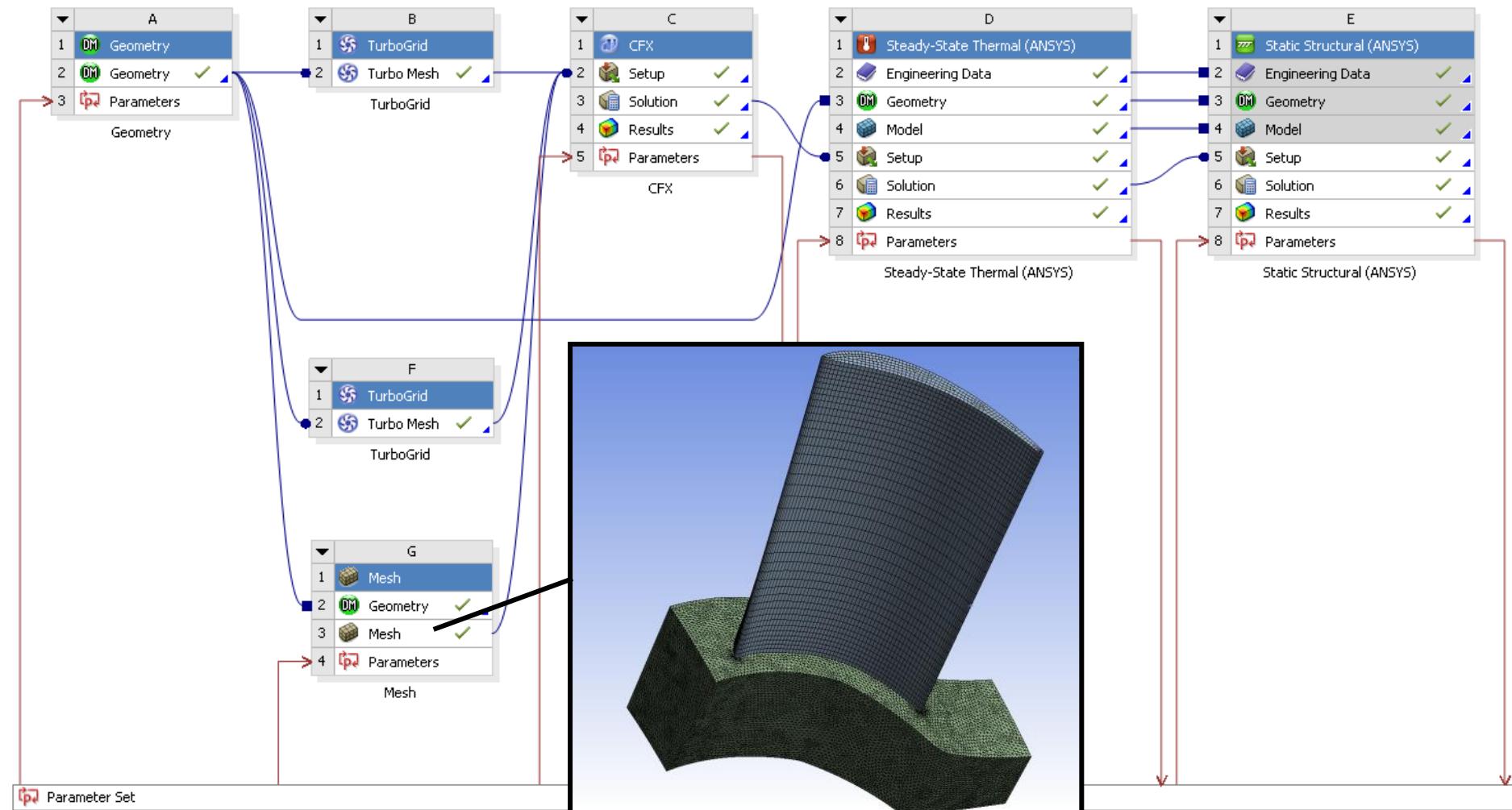
# ANSYS Workbench



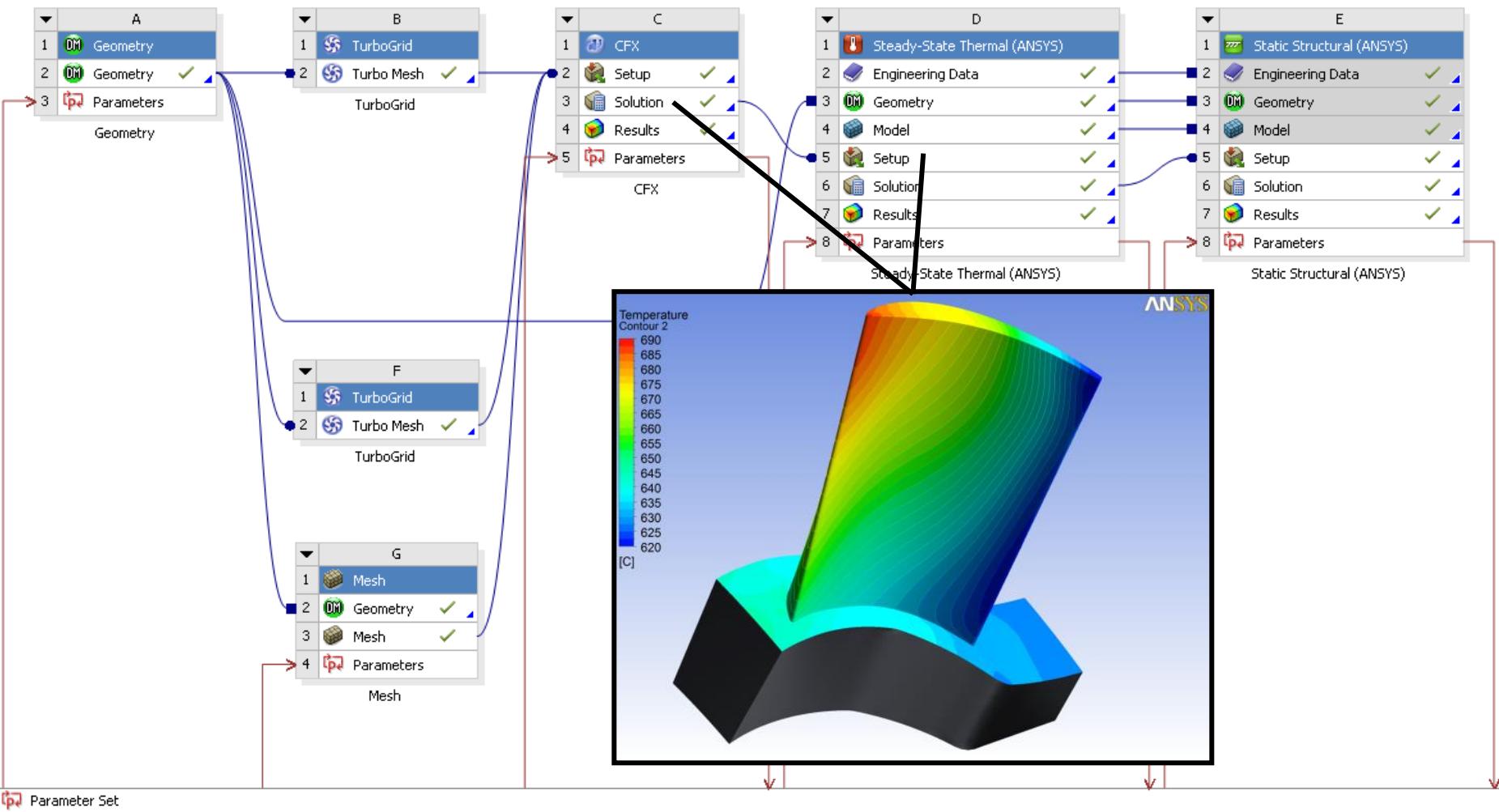
# ANSYS Workbench



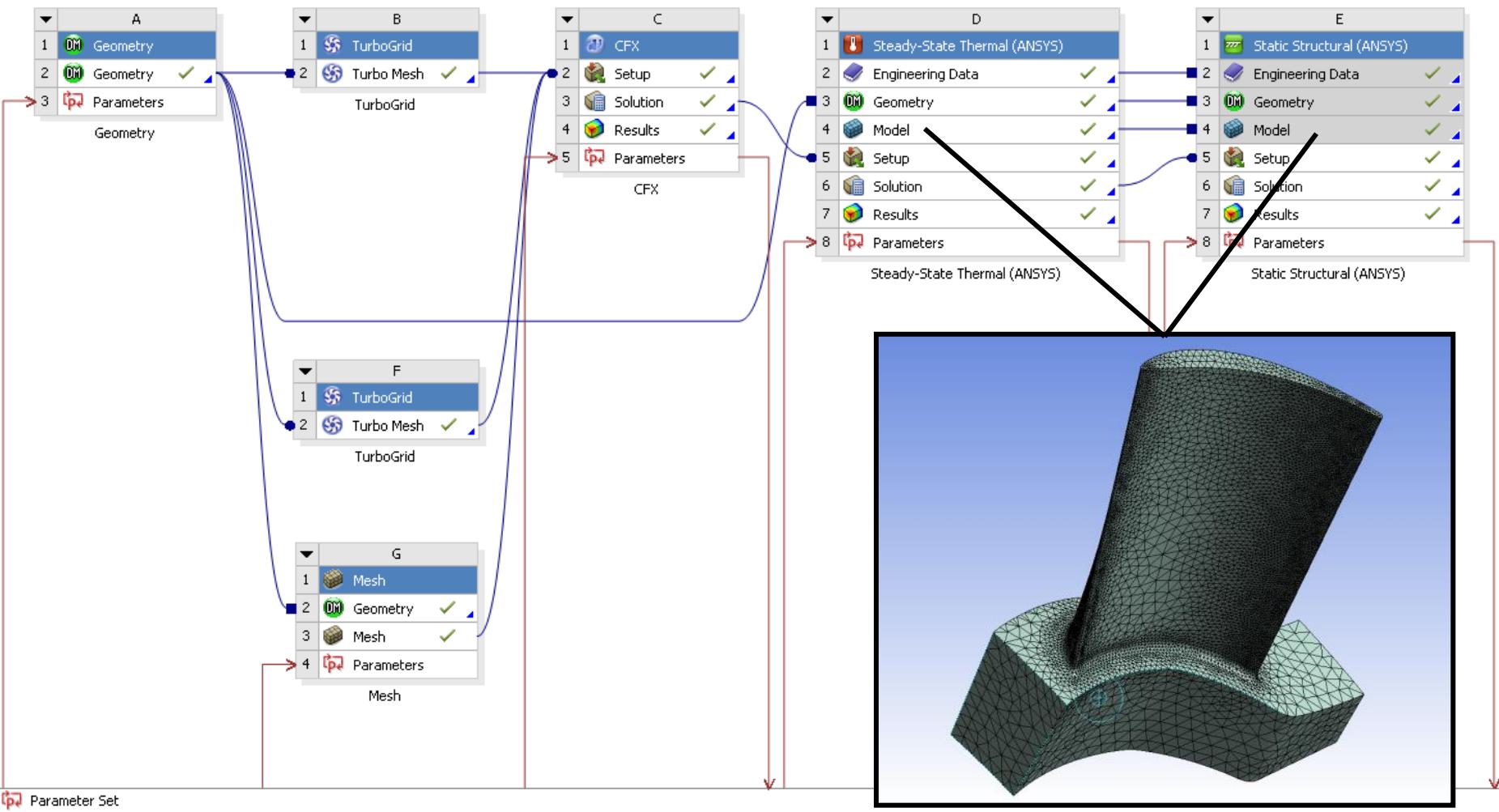
# ANSYS Workbench



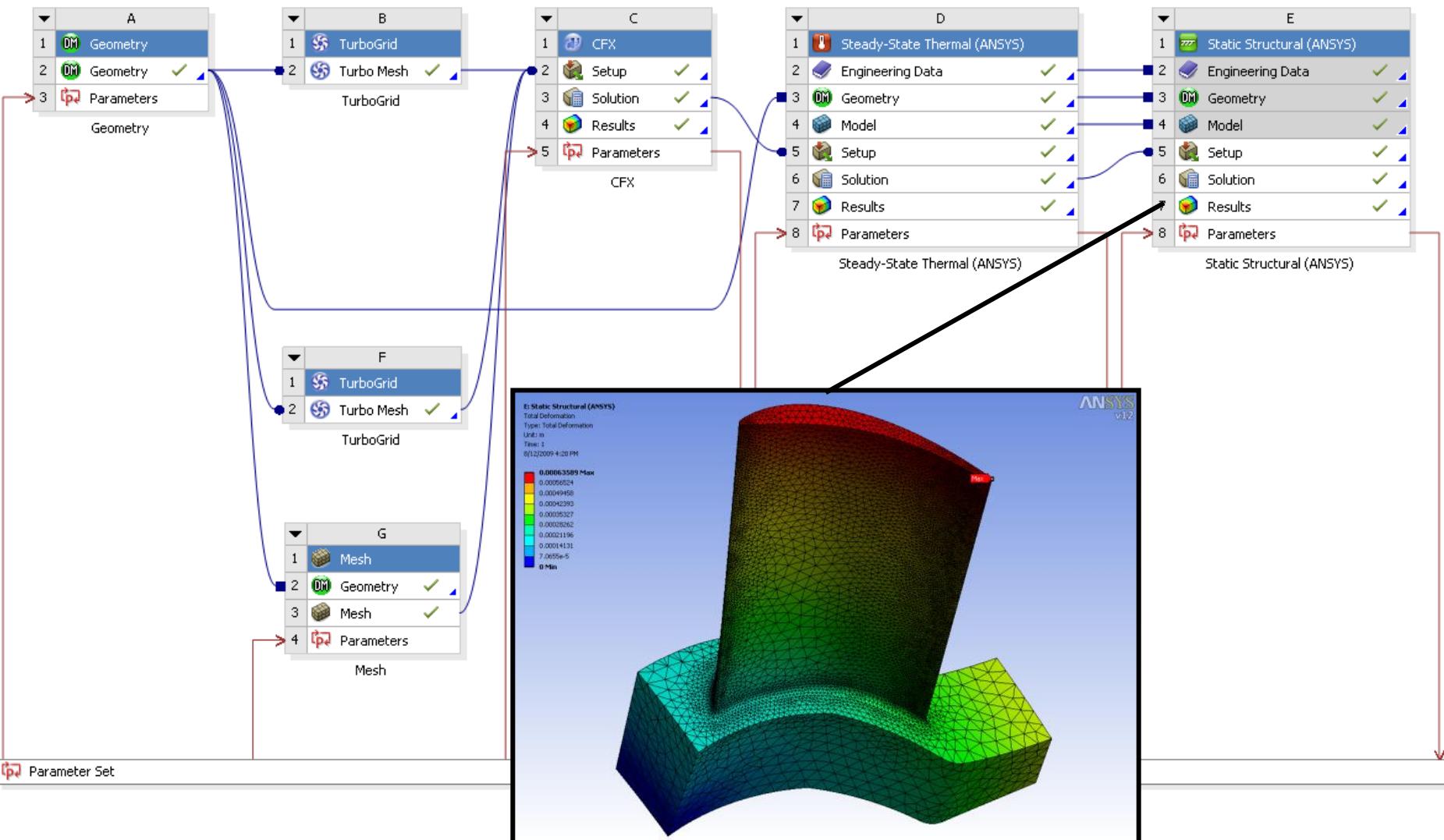
# ANSYS Workbench



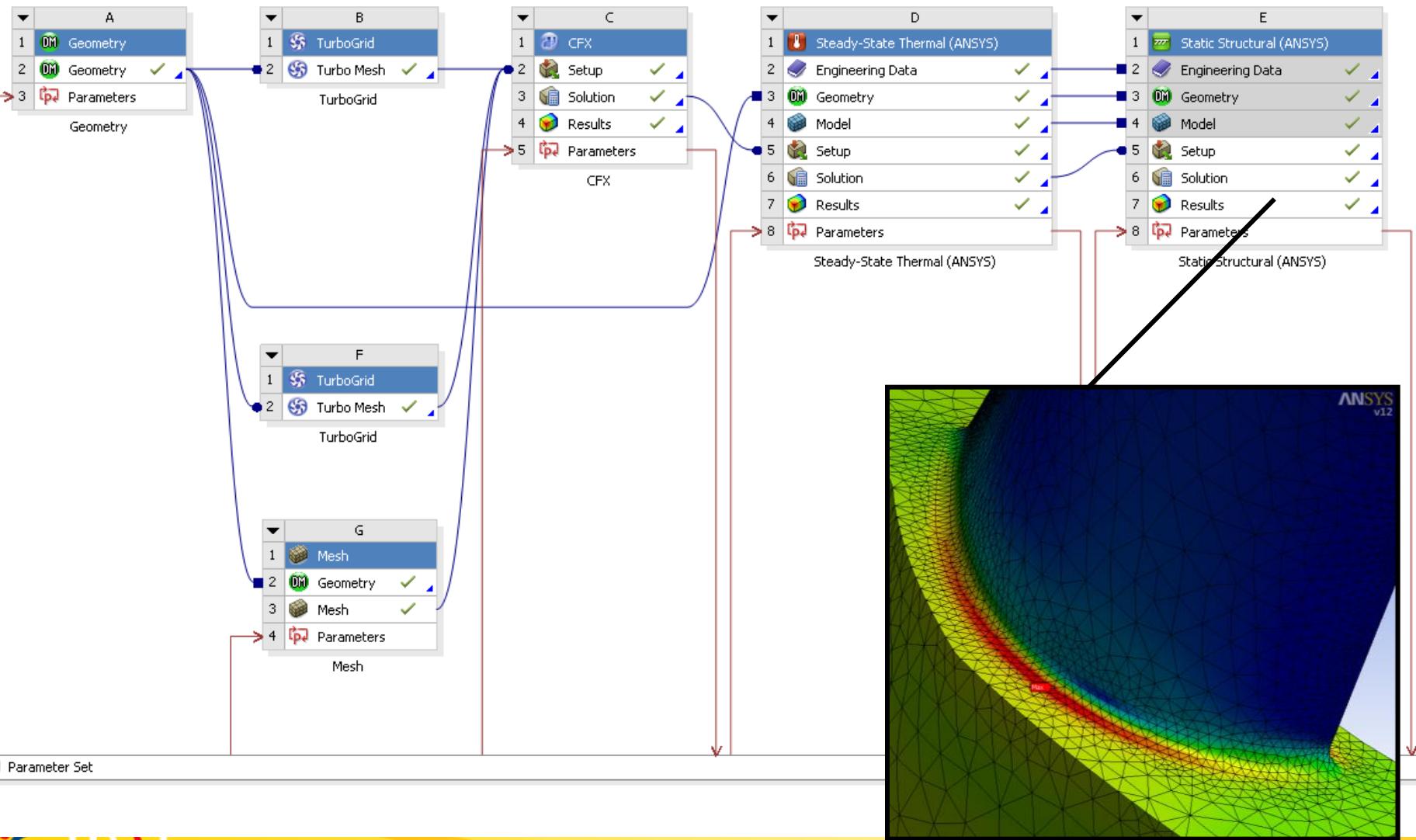
# ANSYS Workbench



# ANSYS Workbench



# ANSYS Workbench



# ANSYS BladeModeler 模块

■ BladeModeler 是快速、易用专门用于旋转机械的三维建模模块，包含以下组件：

➤ **Meanline sizing tools** （中弧线设计工具）

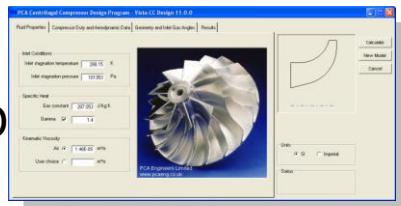
- ✓ Vista AFD (轴流风扇设计)
- ✓ Vista CPD (离心泵设计)
- ✓ Vista CCD (离心压缩机设计)
- ✓ Vista RTD (径向透平机设计)

➤ **BladeGen**

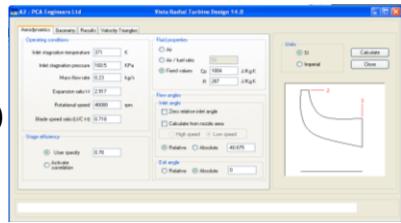
➤ **DesignModeler** （带BladeEditor 插件）

# ANSYS BladeModeler 模块

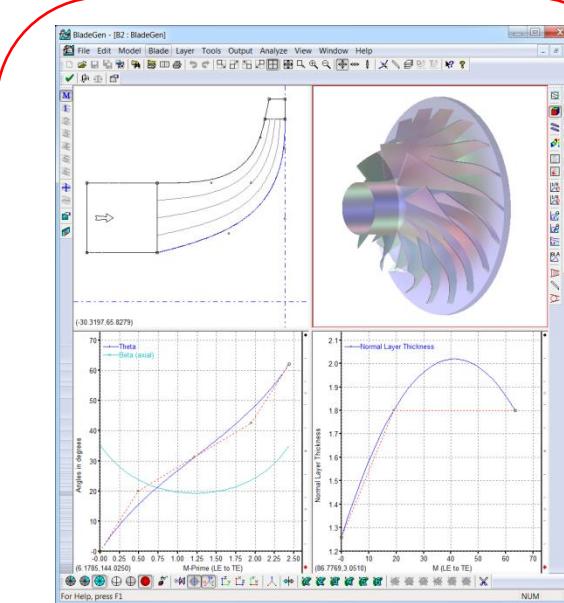
Vista CCD



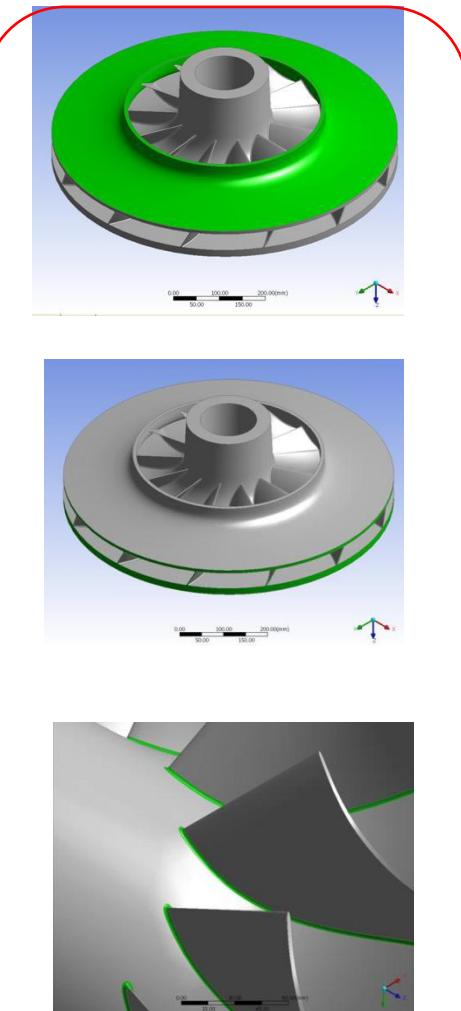
Vista RTD



Meanline sizing tools

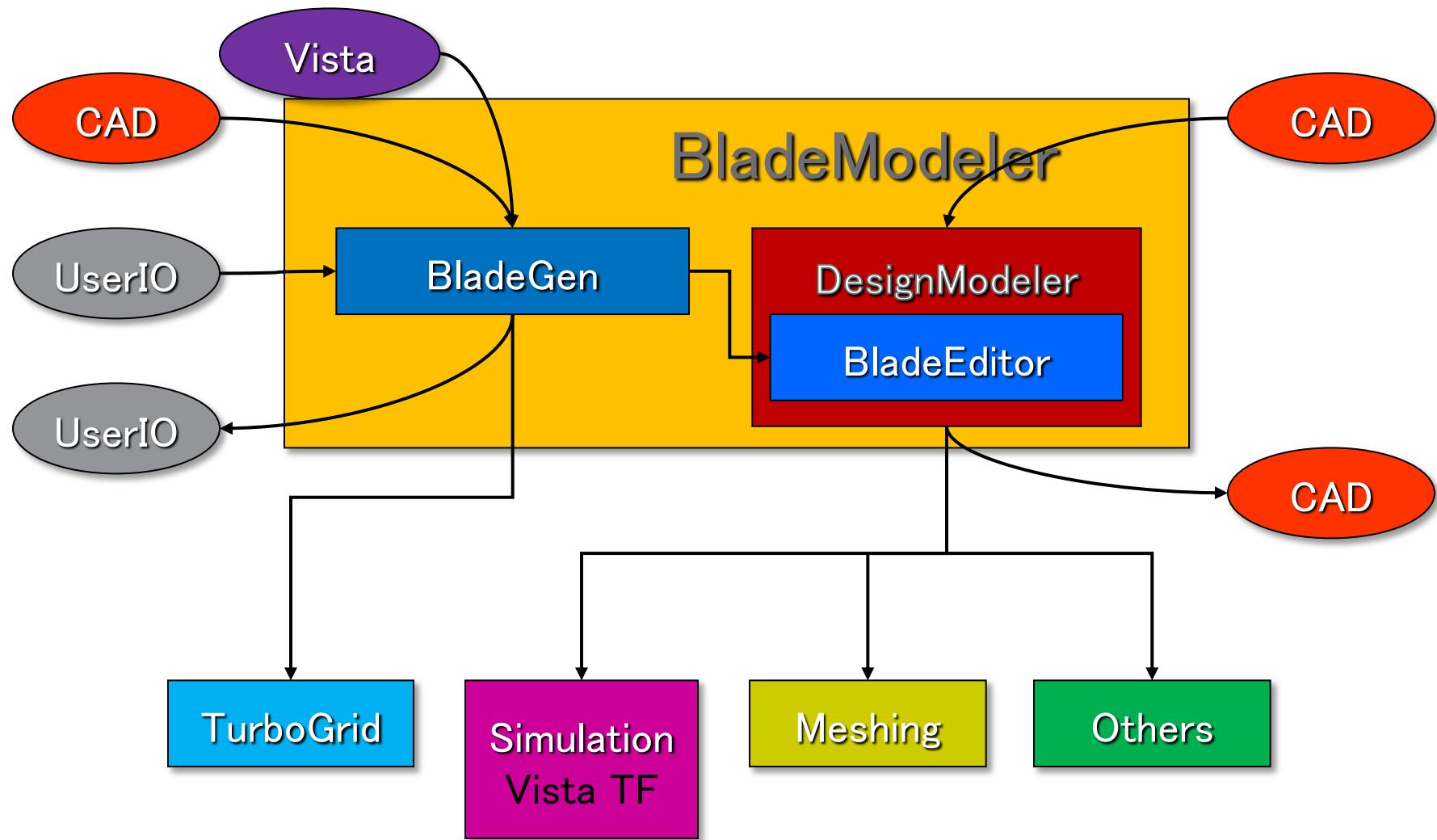


BladeGen

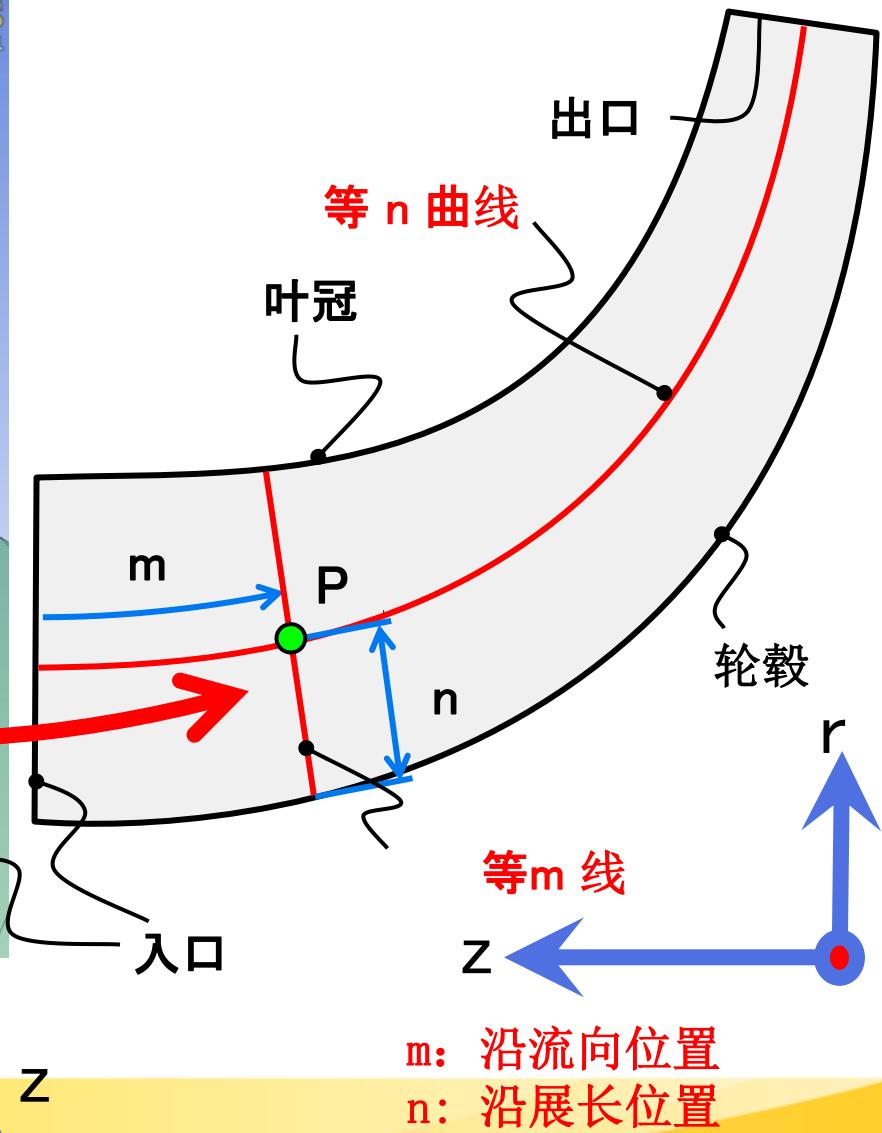
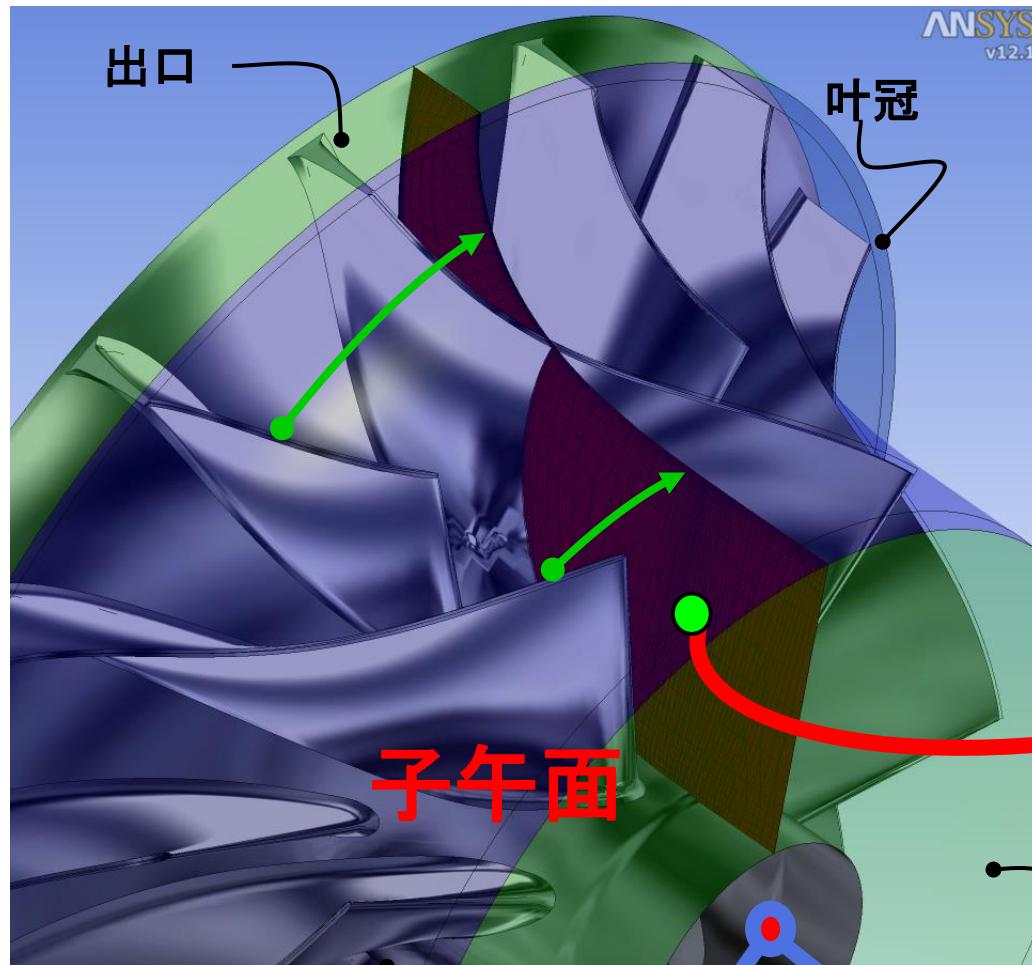


DesignModeler

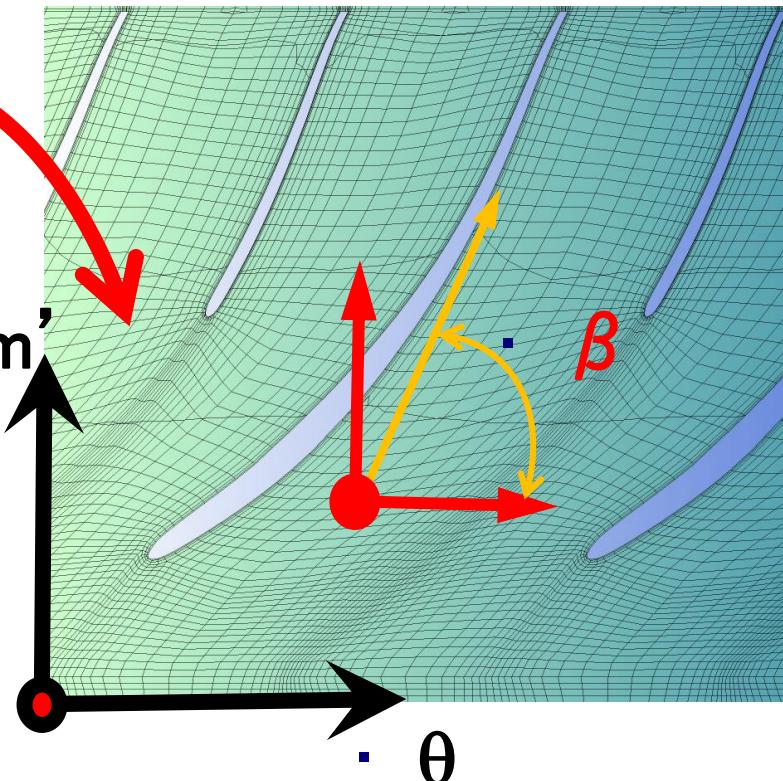
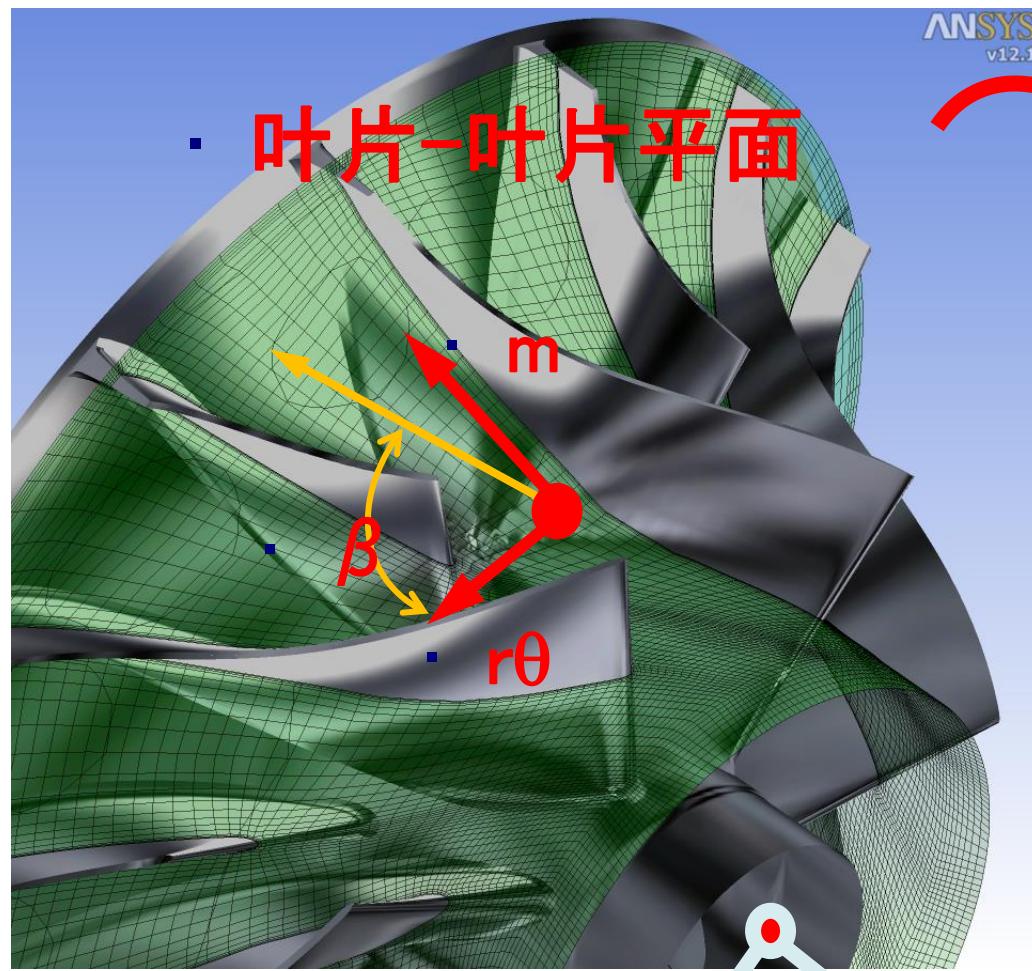
# ANSYS BladeModeler 工作流程



# 中弧线设计工具的相关坐标定义



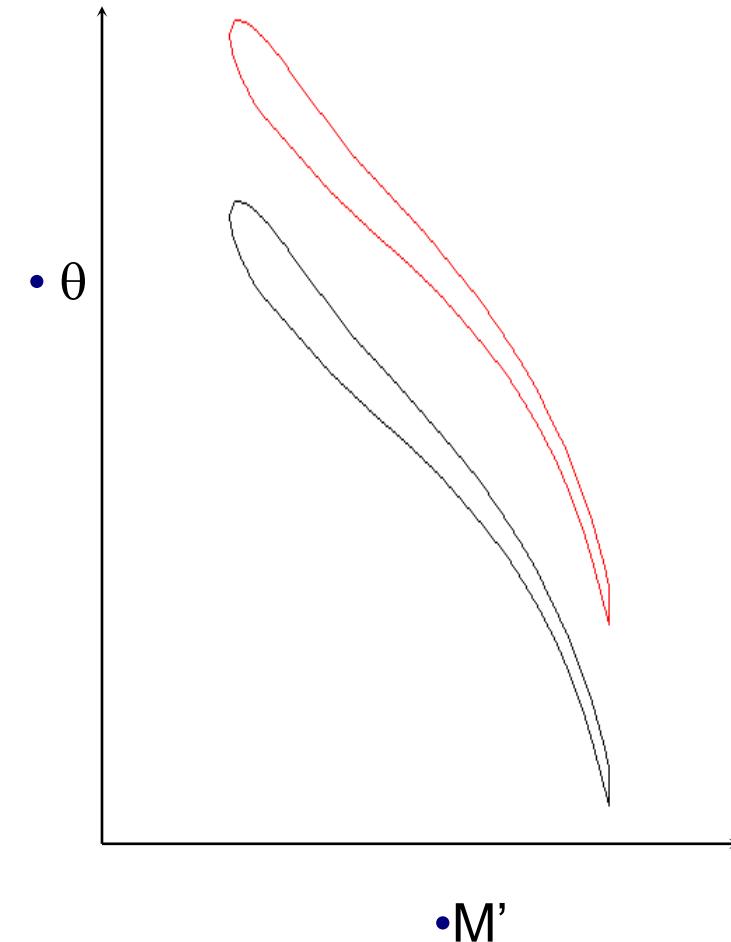
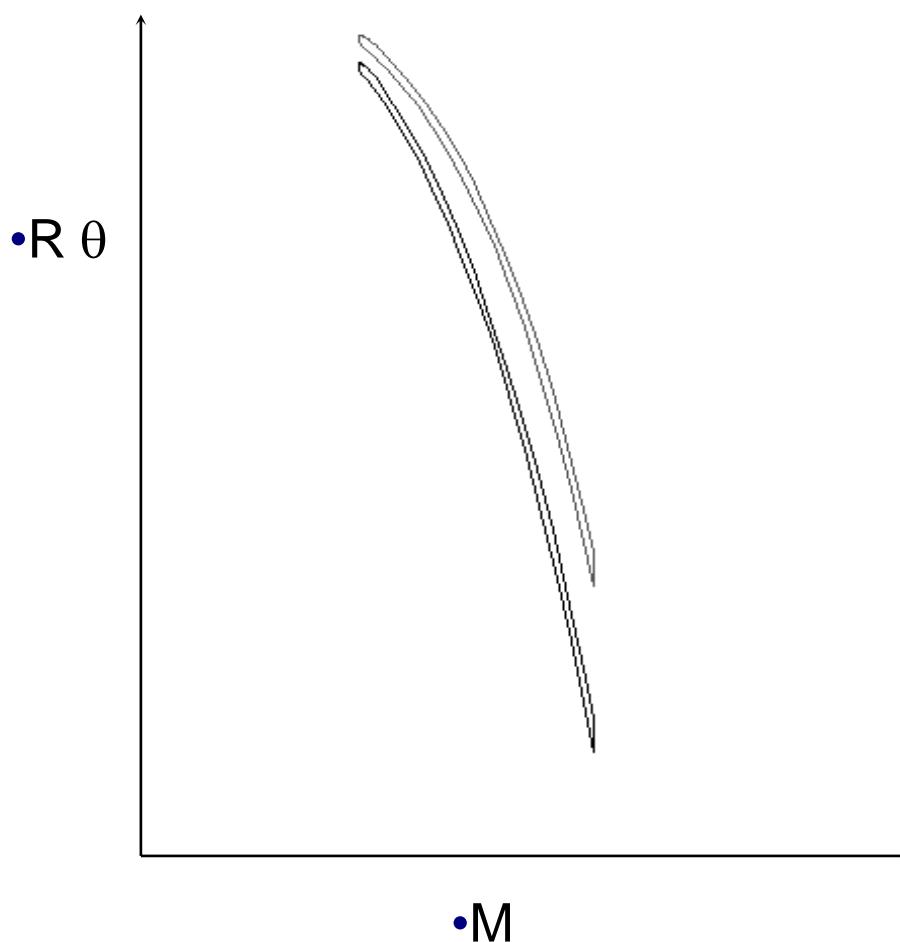
# 中弧线设计工具的相关坐标定义



$$\tan(\beta) = \frac{dm}{r \cdot d\theta} \Rightarrow dm' = \frac{dm}{r}$$

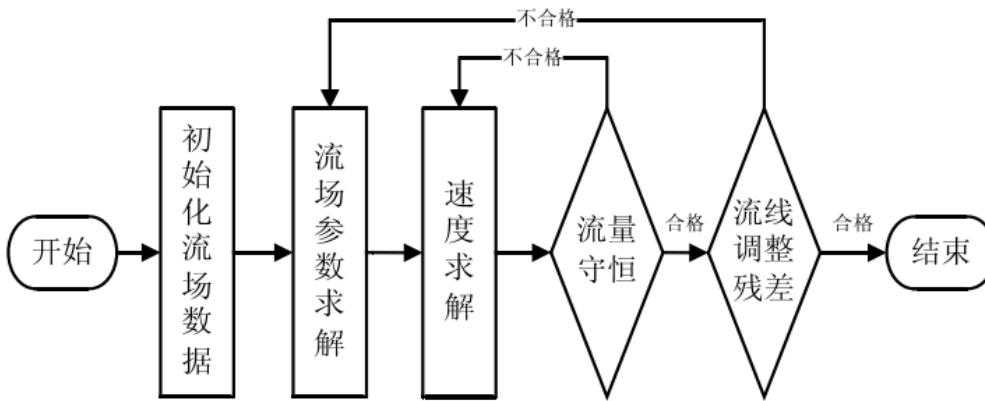
$$z^{\tan(\beta)} = \frac{dm'}{d\theta}$$

# 中弧线设计工具的相关坐标定义



# 快速CFD分析工具: Vista TF 求解器

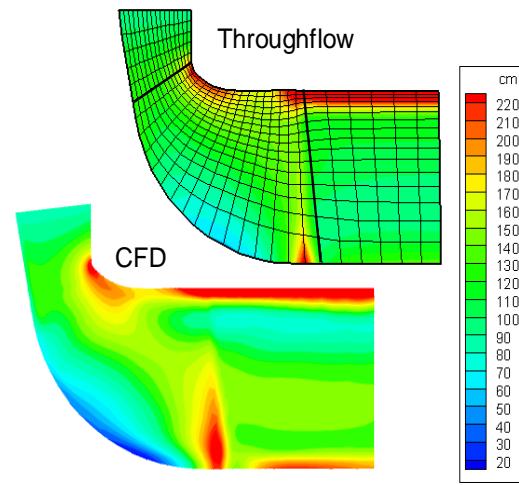
- 连接一维分析和三维CFD模拟之间的桥梁，设计者的重要工具
- 基于流线曲率法求解径向平衡方程，包含了经验修正来考虑摩擦损失、边界层移动和叶片上流动分离的影响。



- 考虑真实的气体属性的影响

## 优点:

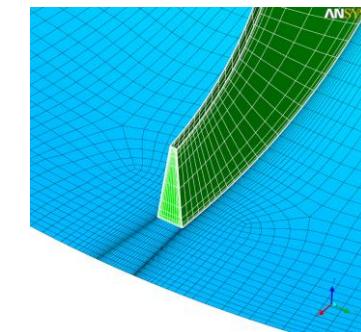
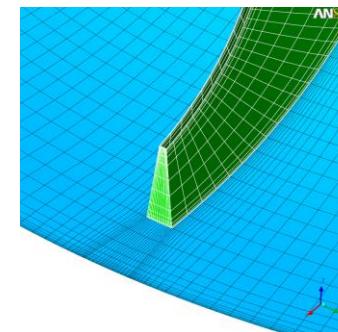
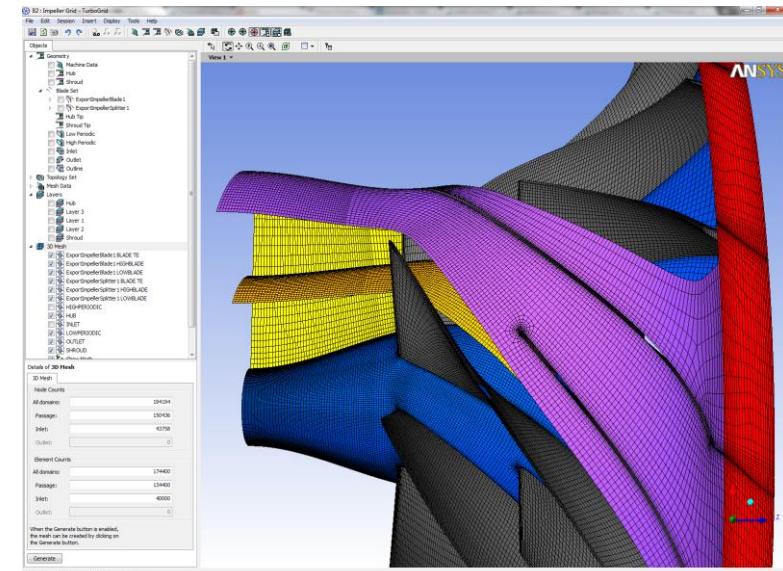
- 快速的修改几何和重新分析
  - 改进叶片和流道设计
  - 非常适合参数化和优化设计



# 三维网格的自动生成工具:ANSYS TurboGrid

## ■ 叶排网格的最佳选择

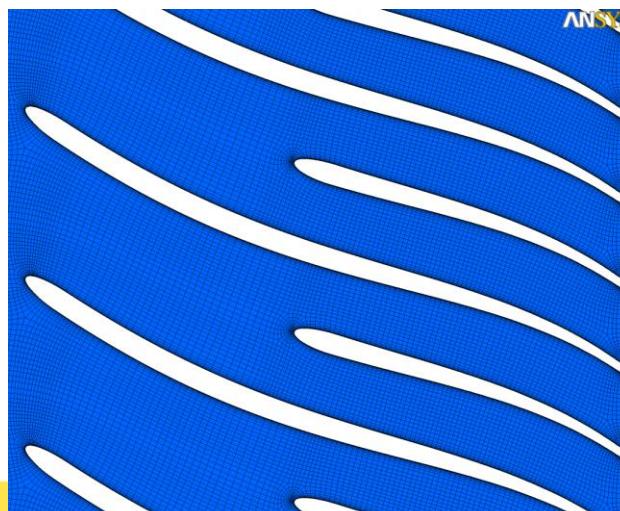
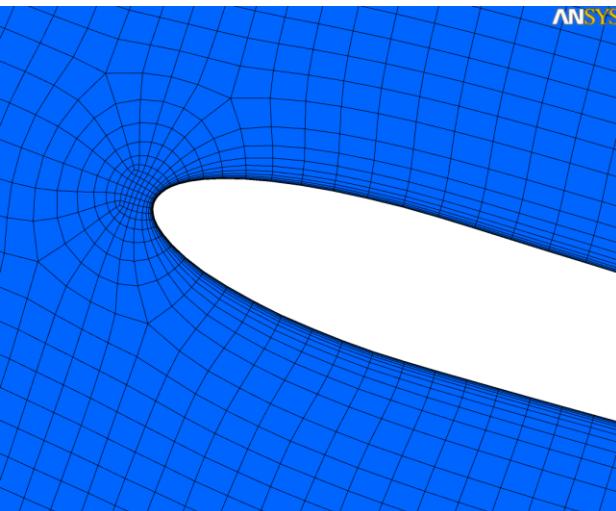
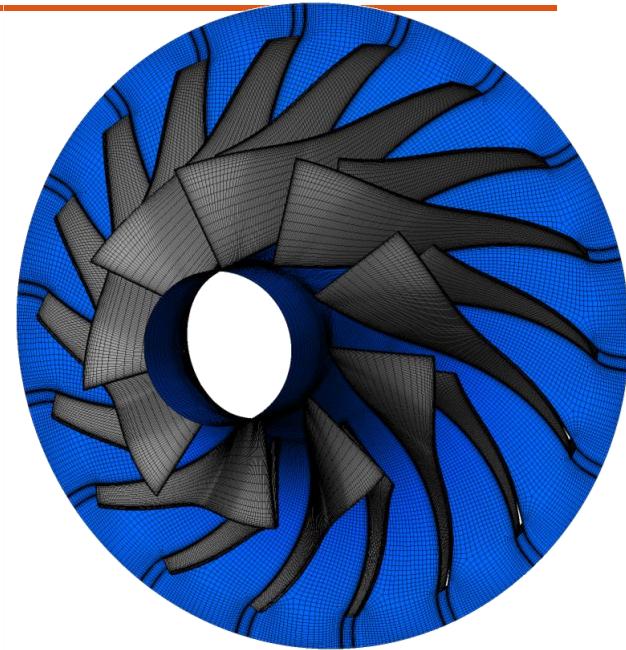
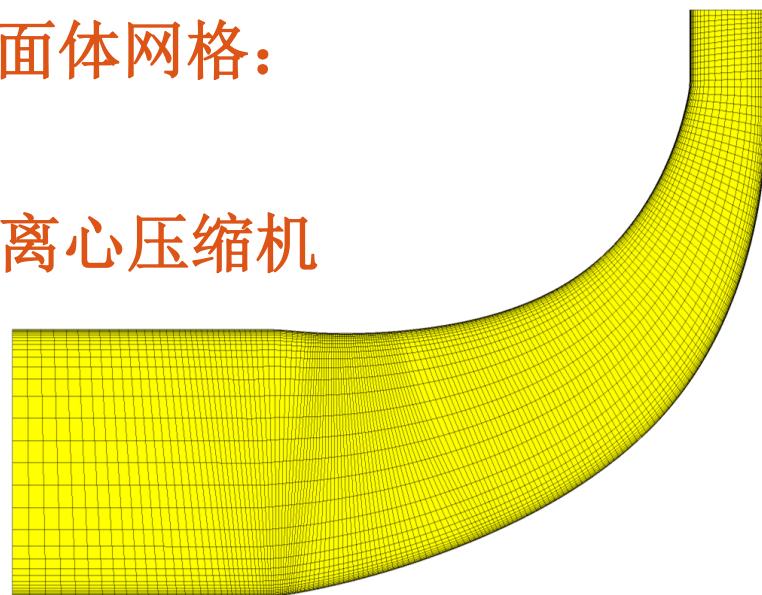
- 用户界面友好，自动化程度高
- 高质量的六面体网格
- 重复性好
  - ✓ 设计比较中将网格的影响降低到最小
- 扩展性好
  - ✓ 保持高质量的网格加密



# 三维网格的自动生成工具:ANSYS TurboGrid

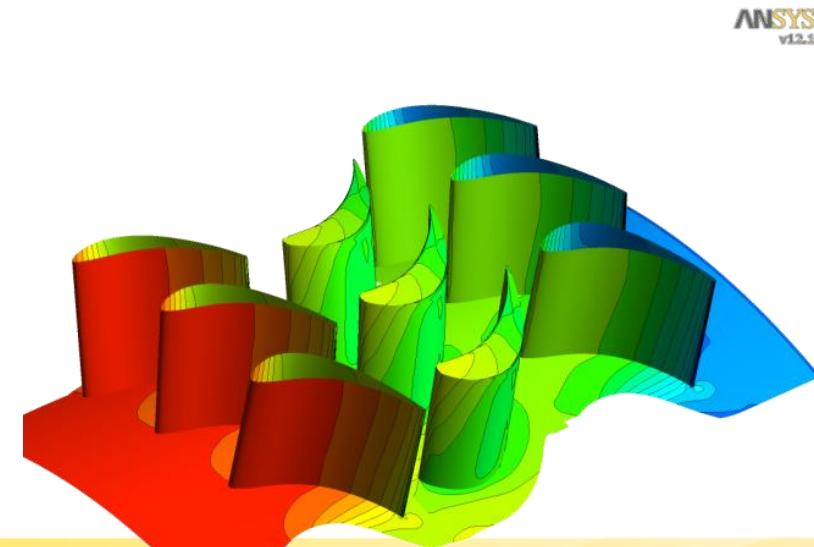
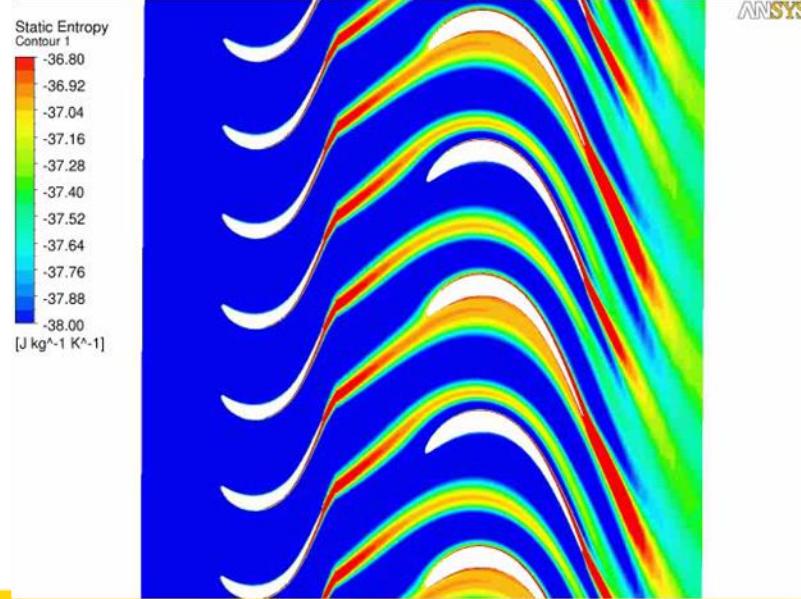
高质量的六面体网格:

- 离心压缩机

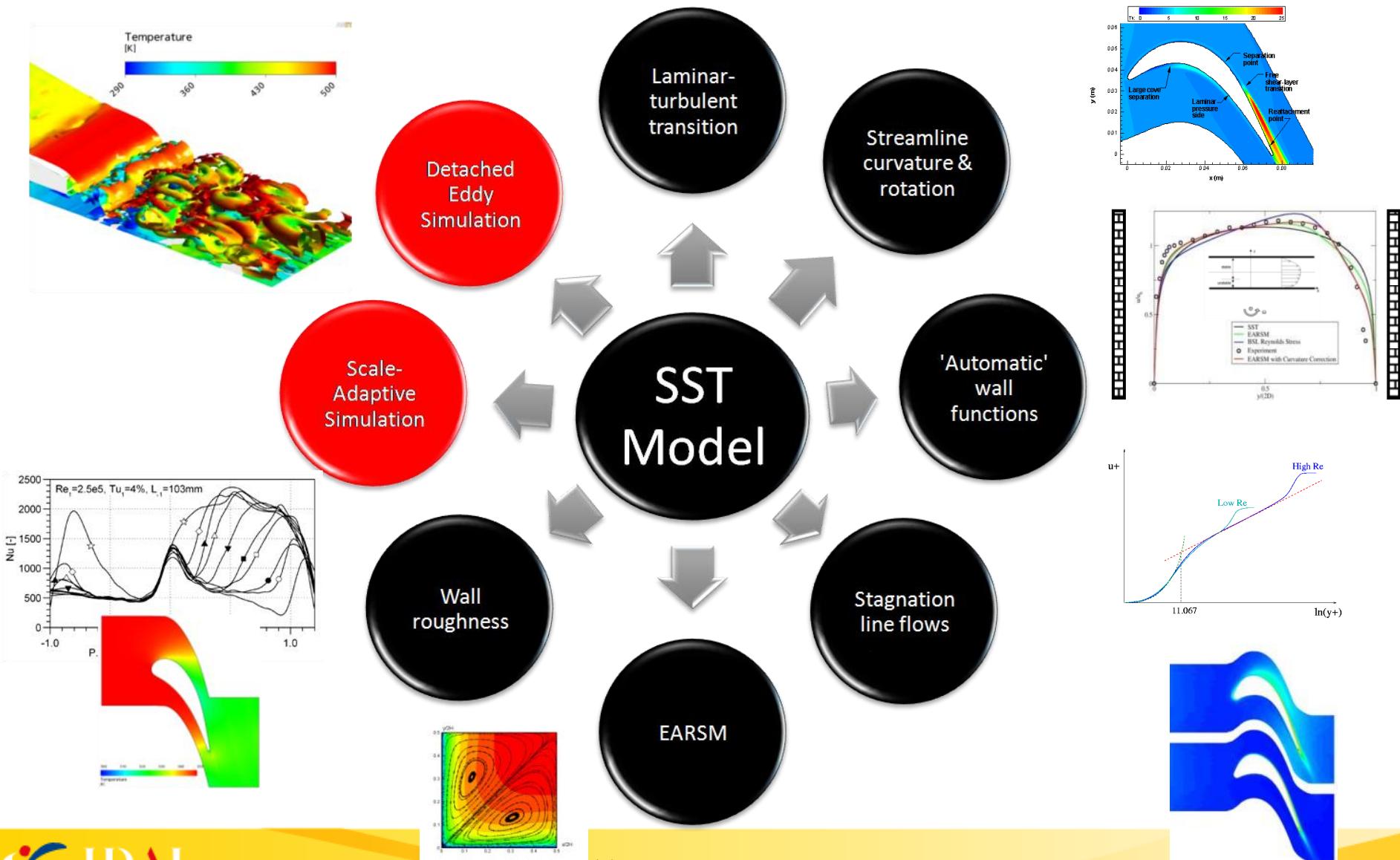


# 透平机械三维流场求解器 ANSYS CFD: CFX Fluent

- 快速和可扩展性求解器
- 低速到超音速流的全速求解器
- 稳态/瞬态求解
- 适用于透平的专用边界条件和设置
- 湍流模型和传热
- 多重坐标系方法
- 多相流
- 真实流体
- 流固耦合...

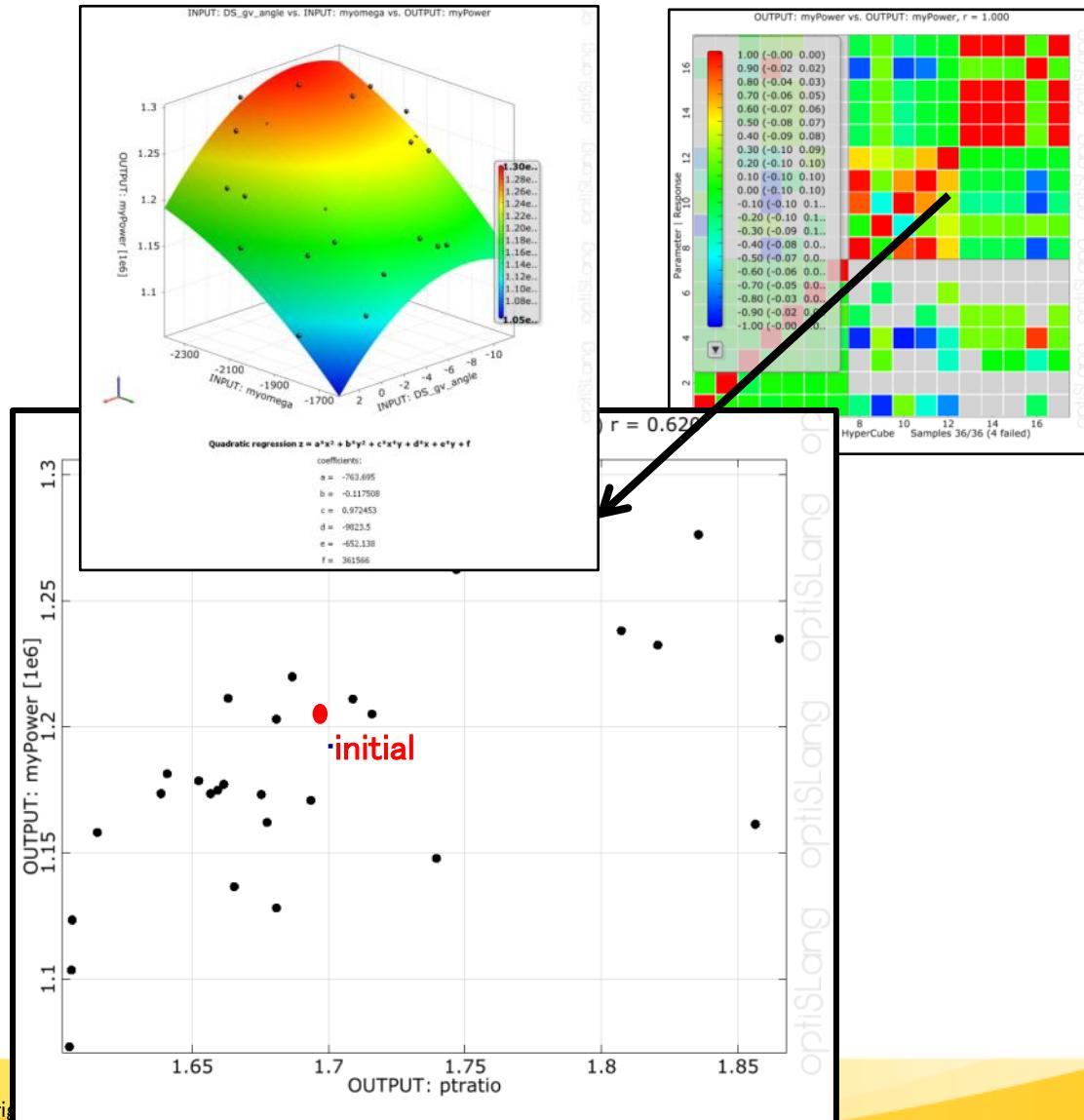
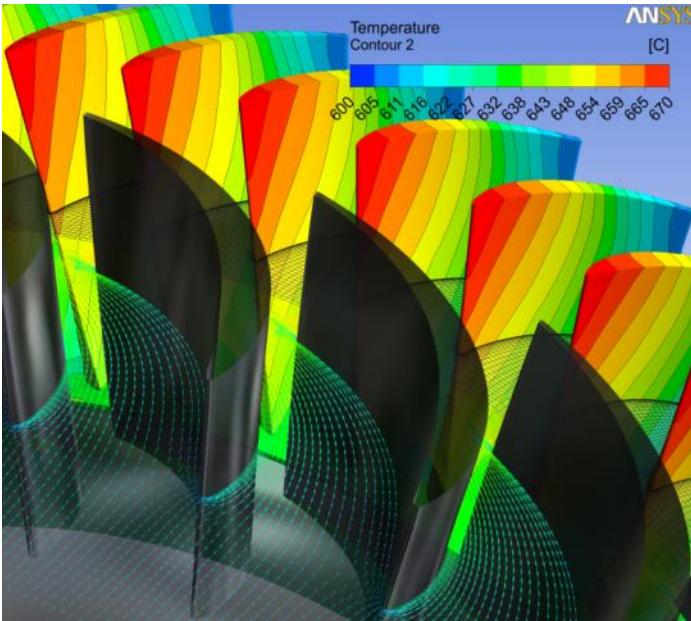


# 丰富的湍流模型



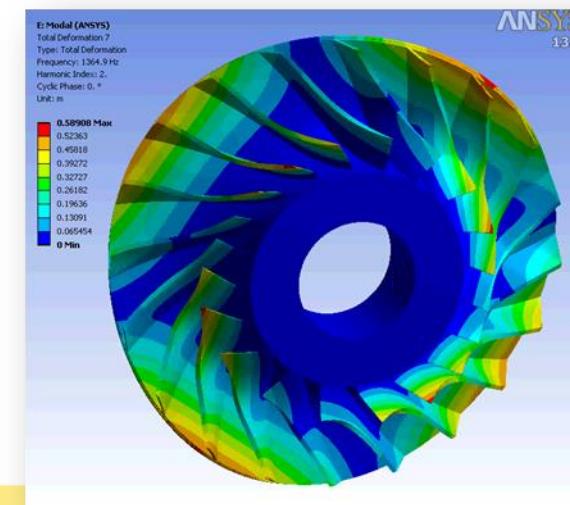
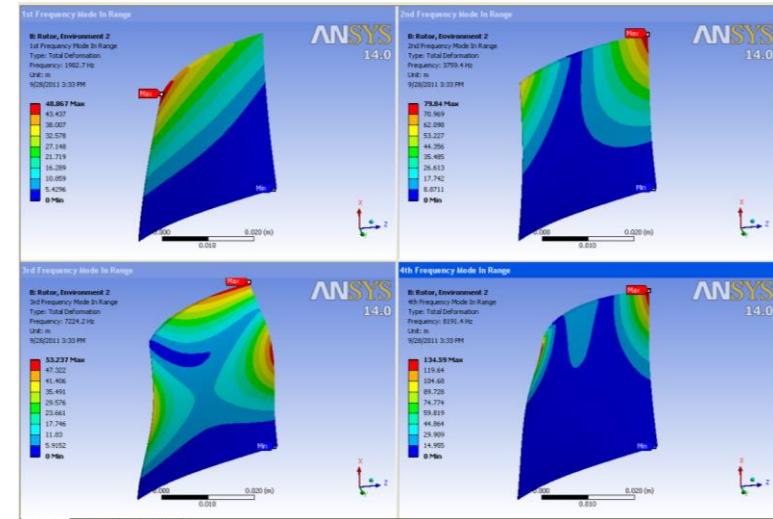
# 优化设计工具：ANSYS Design Exploration

- 敏感性分析
- 设计优化
- 鲁棒性评估



# 涡轮增压器结构力学特性分析

- 受力变形
  - 离心力
  - 表面压力载荷
- 热应力
  - 温度和热流…
- 模态分析
  - 频率
- 叶片颤振
  - 气动阻尼
  - 转子/静子瞬态响应
  - 双向流固耦合



# 涡轮增压器分析典例

## 压缩机设计要求

直径	48 [mm]
叶片数	6 + 6
入口温度	288 [K]
入口压力	101.35 [kPa]
质量流量	0.12 [kg/s]
压比	2.15
叶尖速度	391 [m/s]
轴转速	155,733 [rev $\text{min}^{-1}$ ]

- 带半径比为1.7的无叶片扩压器的高流量比叶轮
- 供给排量为1.6升的汽油发动机使用
- 工作点位于性能曲线的中间位置

# 涡轮增压器分析典例

---

- 几个需要注意的问题
- 总体方法
- 初步设计
- 几何建模和网格划分
- 单独叶轮分析
- 部件分析（叶轮-扩压器-涡壳分析）
- 后处理

# 涡轮增压器分析典例

## 几个需要注意的问题：

- 几何建模方面：
  - 需要考虑倒圆
  - 叶尖间隙为定值或变化
  - 扩展计算区域，设置涡轮增压器上游和下游区域
- 网格划分方面：
  - 叶轮网格（TurboGrid 生成六面体网格）
    - 网格尺度大小、计算精度和计算时间的平衡
    - 边界层的分辨率和Y+
    - 叶尖间隙
    - 网格的长宽比

# 涡轮增压器分析典例

## 几个需要注意的问题：

- 网格划分方面
  - 涡壳网格 (ANSYS 网格划分)
    - 边界层附近采用四面体+三棱柱网格
    - 涡舌附近网格局部加密
    - 扩压器出口网格和涡壳入口网格的匹配
- 计算设置方面
  - 求解能量方程时考虑传热和粘性作用（需要激活选项）的影响
  - 采用SST  $k-w$ 模型（确保边界层内不少于10个网格节点）
  - 边界条件类型：
    - 入口设置总温、总压条件
    - 在壅塞状态下，出口设置静压边界条件
    - 在设计点或失速点，出口设置质量流量条件
  - 对流格式：推荐采用二阶高分辨率格式

# 涡轮增压器分析典例

## 几个需要注意的问题：

- 收敛性方面
  - 计算时间步设置在 $0.1/\Omega_{mega}$  与  $1/\Omega_{mega}$  之间  
 $\Omega_{mega}$ 为旋转角速度
- 计算后处理
  - 用于生成涡轮增压器特性曲线图的宏文件
  - 用于生成HTML格式报告的宏文件，该报告的计算结果参数包括扭矩、流量系数、叶片载荷和效率
  - 创建自己的宏文件，实现以Perl语言为基础的后处理定制

# 涡轮增压器分析典例

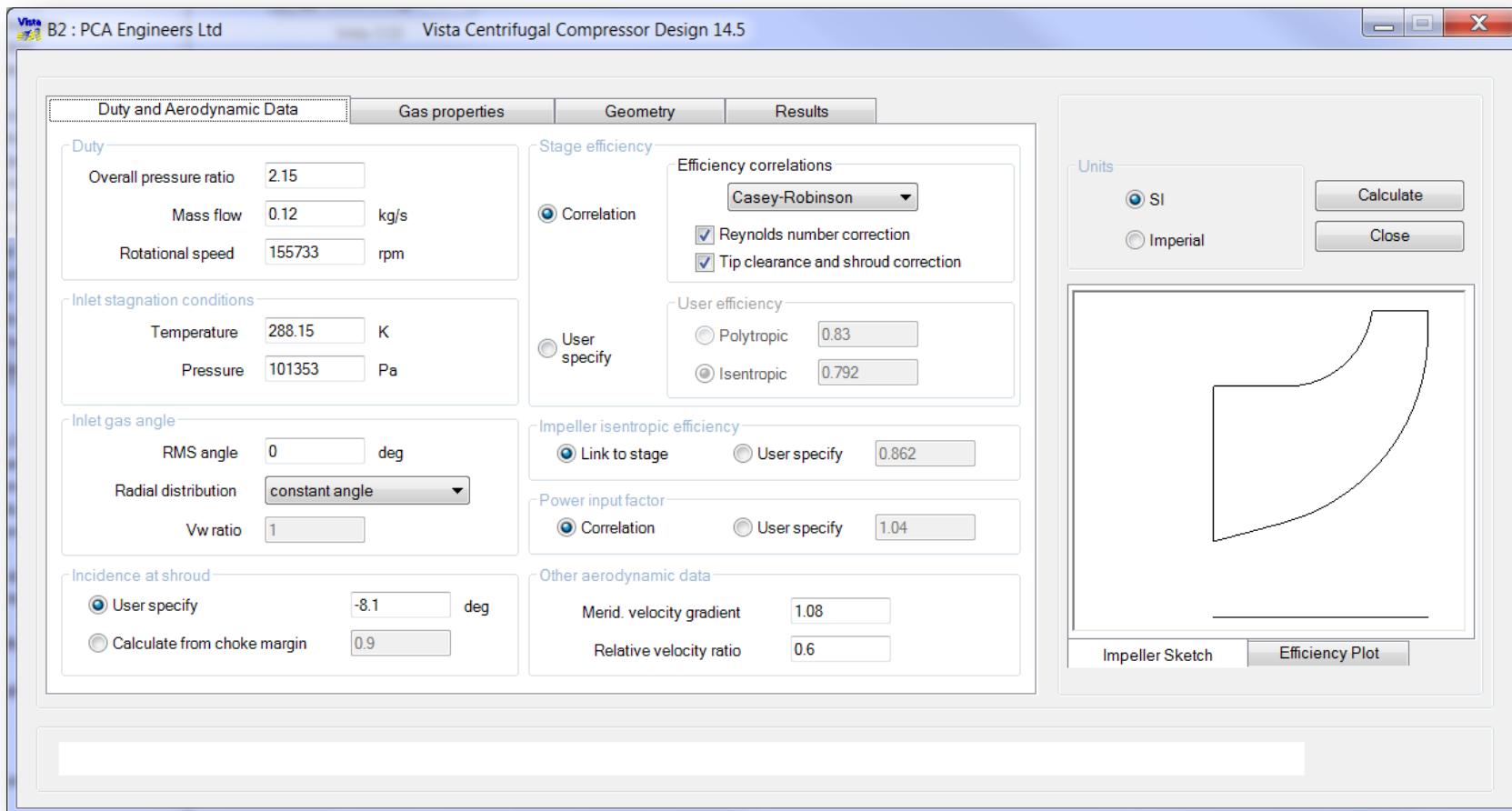
## 总体方法：

- CFD的准备工作
  - 符合设计要求的几何建模
    - 从 Vista CCD, CCM, TF 到 BladeModeler
- 单纯叶轮分析
  - 叶轮是整个涡轮增压系统的核心部件
  - 如何使得性能良好，并使得更好
  - 流动特性，优缺点
  - 影响性能的因素
- 整体系统
  - 叶轮-扩压器-涡壳分析
- 后处理
  - 定量和定性分析

# 涡轮增压器分析典例

## 初始设计：

- 根据设计要求，利用Vista CCD 构建几何模型

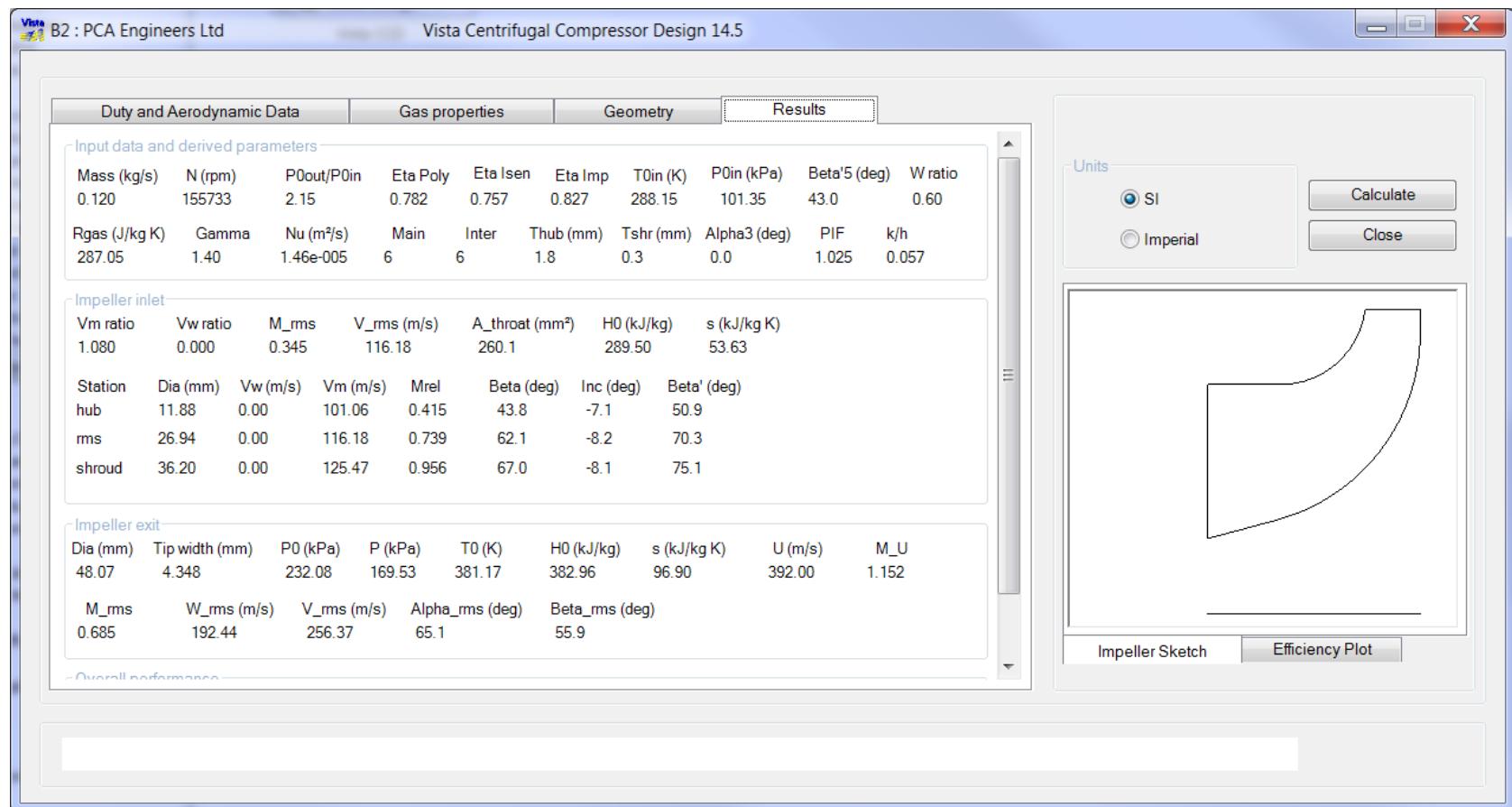


# 涡轮增压器分析典例

## 初始设计：

### Vista CCD 输出

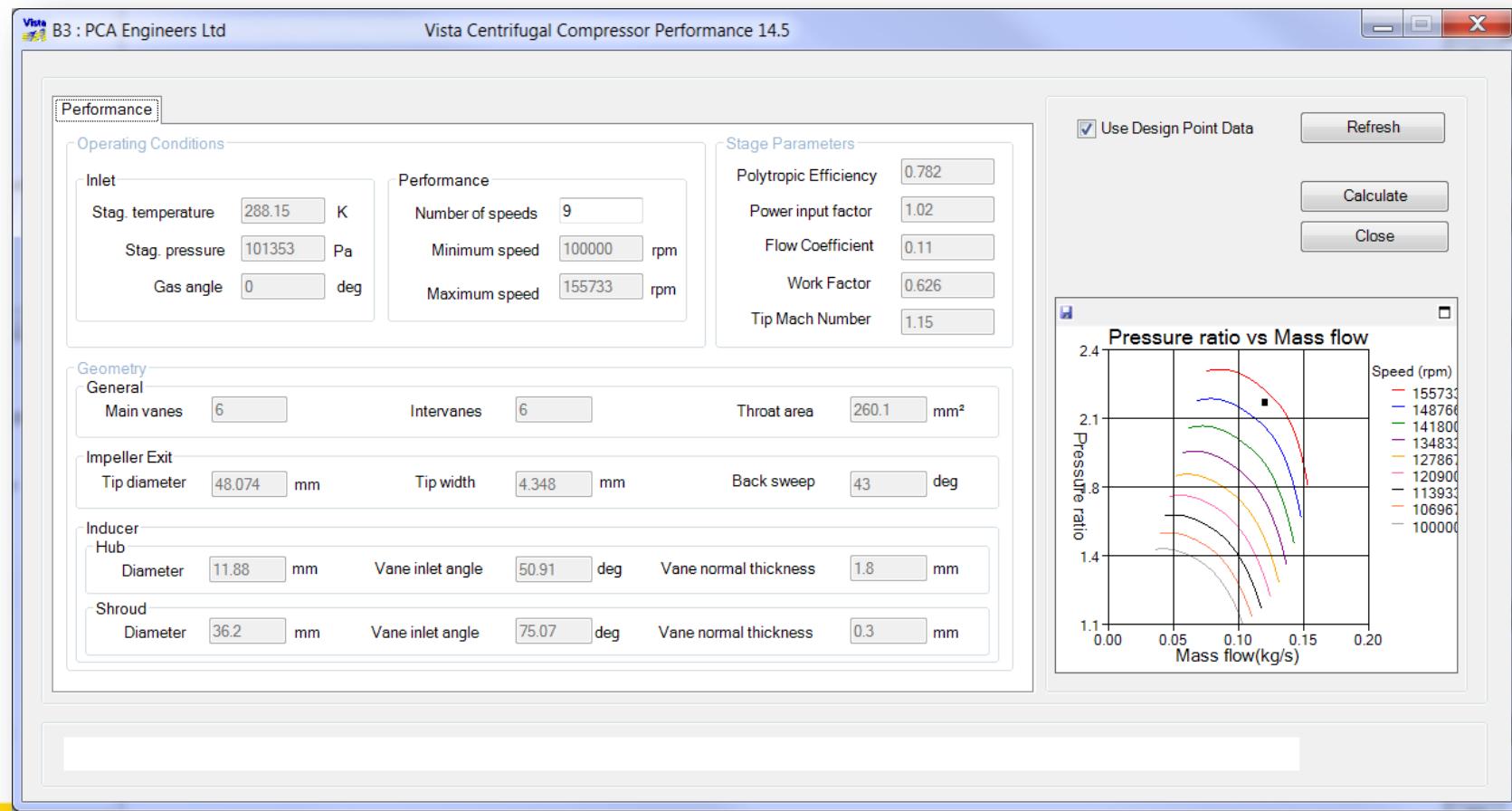
- 通过CCD的迭代计算得到满足基本要求的初始设计



# 涡轮增压器分析典例

## 初始设计： Vista CCM 输入

- 利用Vista CCM 创建初始设计的压缩机工作特性曲线

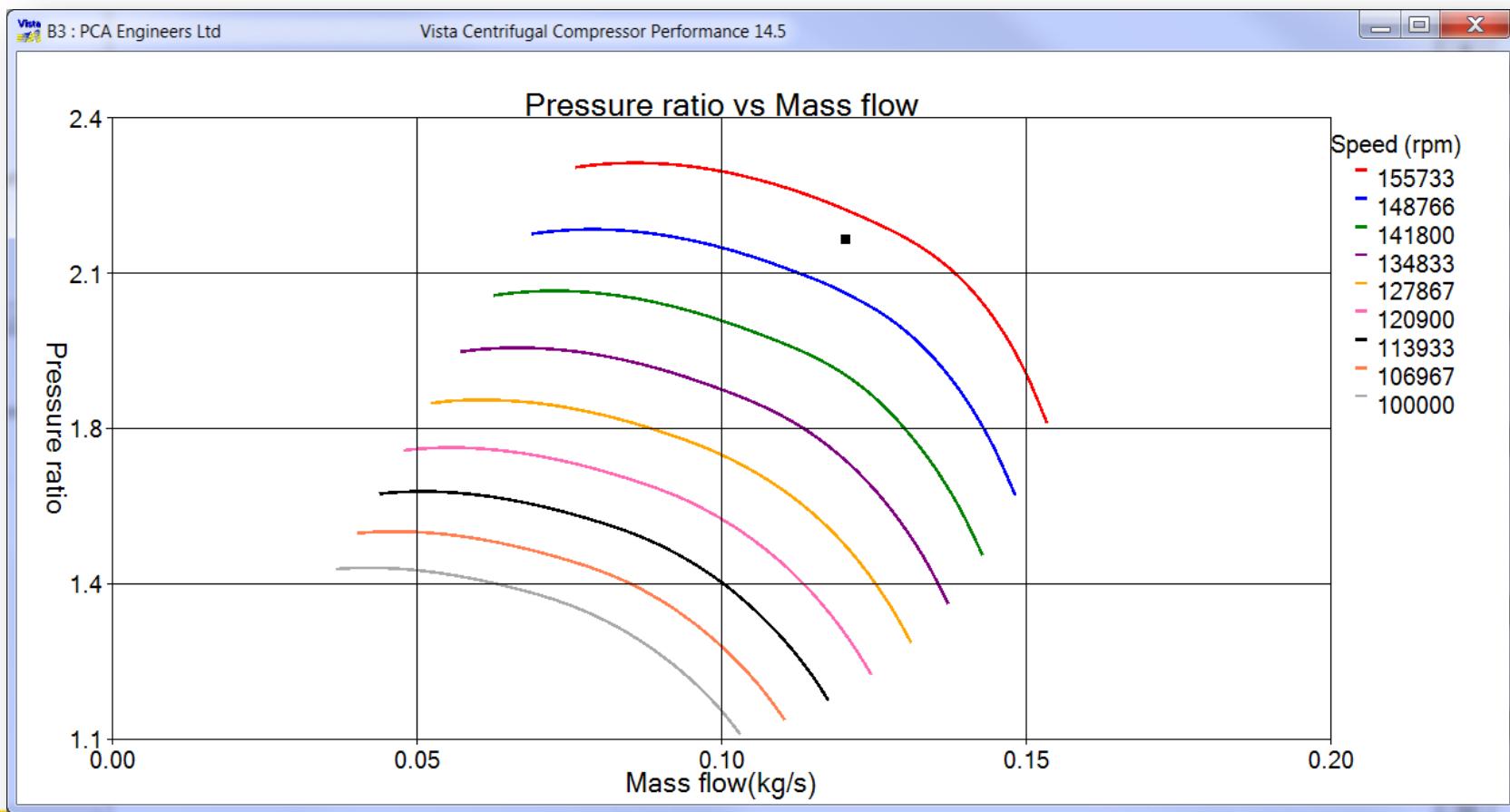


# 涡轮增压器分析典例

## 初始设计：

Vista CCM 输出

- 涡轮增压器在非设计工况下的典型工作点



# 涡轮增压器分析典例

## 几何建模：

- VISTA CCD的一维设计
  - 基于规定的要求和设计约束
- 叶轮几何模型
  - VISTA CCD, CCM → BladeModeler → VISTA TF
  - 根据尺寸大小要求、设计准则等做调整
    - 子午面
    - 叶片型面和厚度
    - 轮毂/背面
    - 叶顶间隙
- 涡壳几何模型
  - 基于电子表格设计
    - 质量+角动量守恒方法
    - DesignModeler参数化几何建模

# 涡轮增压器分析典例

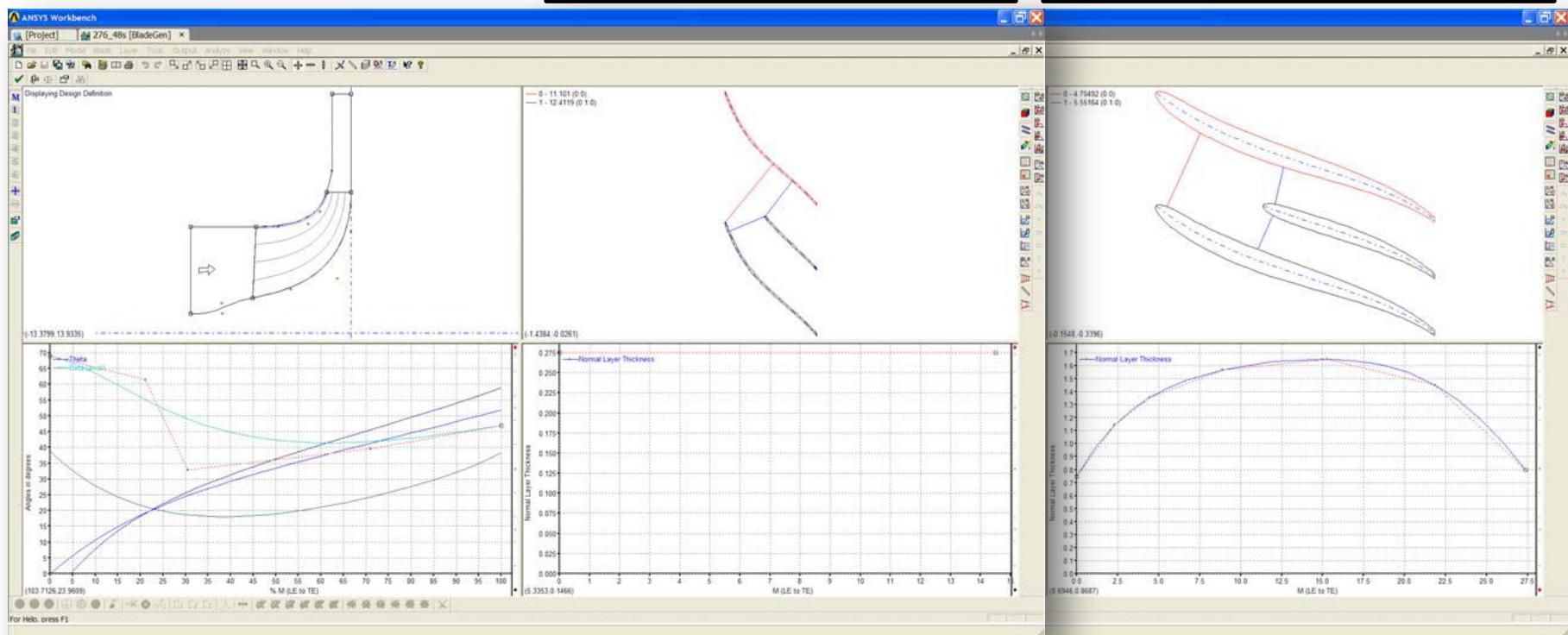
## 几何建模：

BladeModeler为VISTA TF提供几何模型

– 从Vista CCD轻松获得模型几何参数

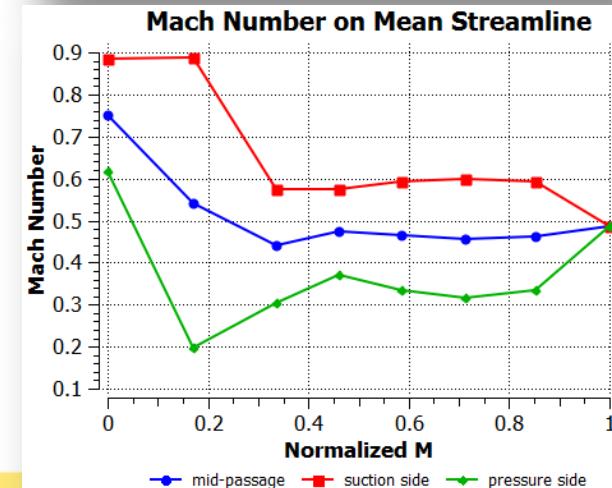
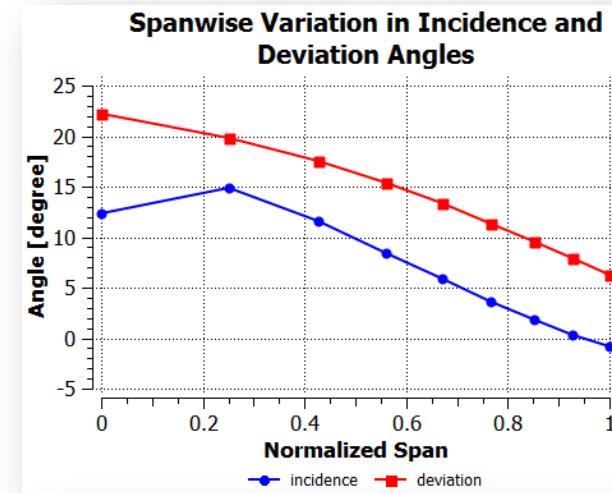
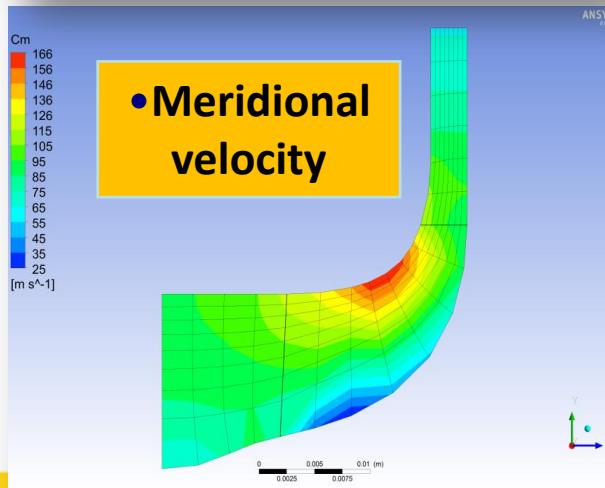
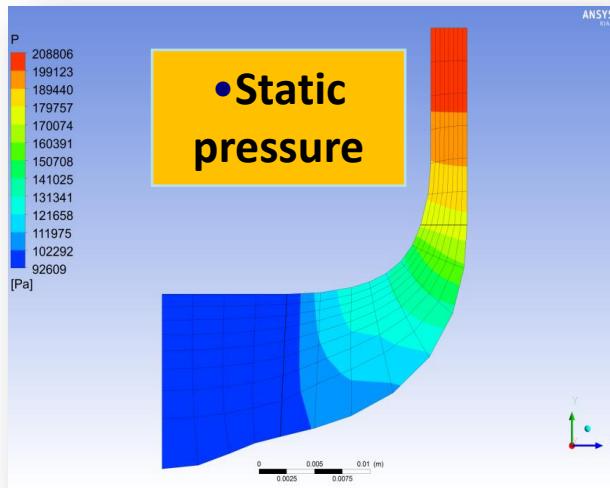
压缩机轮缘剖面

压缩机轮毂剖面



# 涡轮增压器分析典例

## 几何建模: Vista TF: 定性结果输出

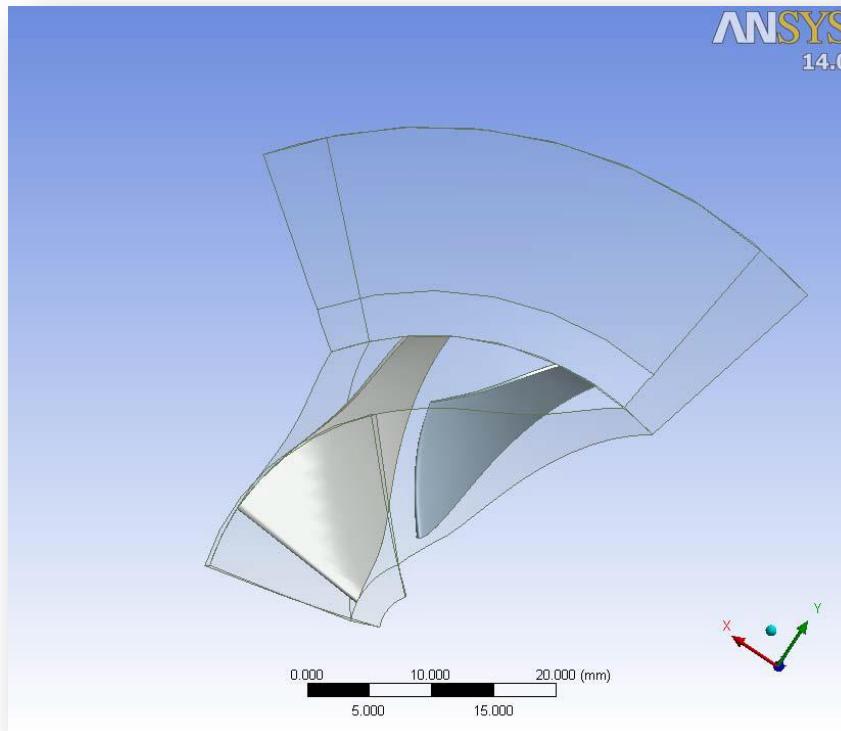


# 涡轮增压器分析典例

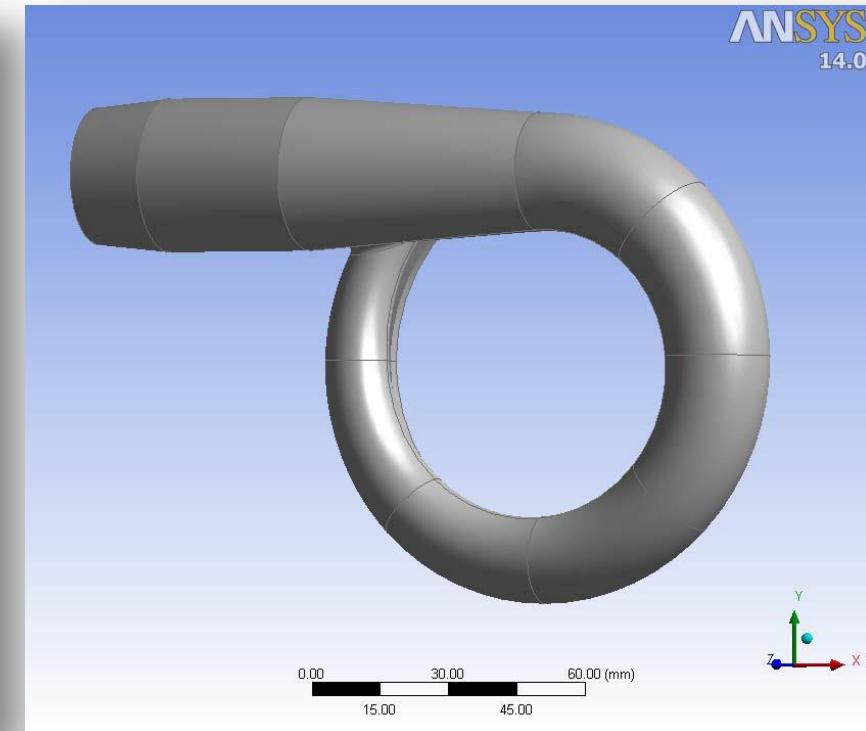
## 几何建模：

网格生成前的最后步骤：叶轮和涡壳的最终设计

- 几何直接导入TurboGrid
- 创建用于生成四面体网格的流道
- 生成与叶轮相匹配的涡壳



叶轮和无叶片扩压器



涡壳

# 涡轮增压器分析典例

## 网格生成：

- 叶轮网格
  - TurboGrid ATM 生成六面体网格
  - 应注意：
    - 目标网格尺度
    - 均衡
    - 边界层的分辨率
    - $Y+$
    - 叶尖间隙
    - 网格的展弦比
- 涡壳网格
  - ANSYS网格生成
  - 边界层生成四面体+三棱柱网格
  - 涡舌附近的网格局部加密
  - 扩压器出口和涡壳进口的网格匹配

# 涡轮增压器分析典例

## 单纯叶轮分析：

- 叶轮+部分无叶片扩压器
  - 模型的无叶扩压器多大模拟空间？
- 网格加密研究
  - 网格是影响计算结果的最大因素
  - 四面体网格和六面体网格
  - 理解网格尺度对计算结果的影响
    - 计算用的网格尺度满足  $Y+=2$
    - 在各个方向上加倍或减半网格尺度
      - 计算用的网格尺度的 $1/8X$ ,  $1X$ ,  $8X$
    - 估计与网格无关的解
  - 圆角的影响
  - 关注性能曲线上的关键点
    - 设计工况点, 喘振边界, 近阻塞点、阻塞点

# 涡轮增压器分析典例

## 单纯叶轮分析：网格无关性研究

六面体和四面体网格用于计算叶轮+无叶片扩压器流场的比较  
 在155, 733 rpm转速上检验三个工作点：  
 •设计流量状态, 近堵塞点, 近失速/喘振点

六面体

# of Nodes	Blade Y+	Meshing Tool	Meshing Method	Meshing Time	Mesh File Size	Max Vol Ratio	Max Length Ratio
0.142m	8	TurboGrid	ATM	1 min	3.67MB	159	2132
1.12m	4	TurboGrid	ATM	1 min	34.8MB	88	4308
8.58m	2	TurboGrid	ATM	3 min	273MB	34	3547

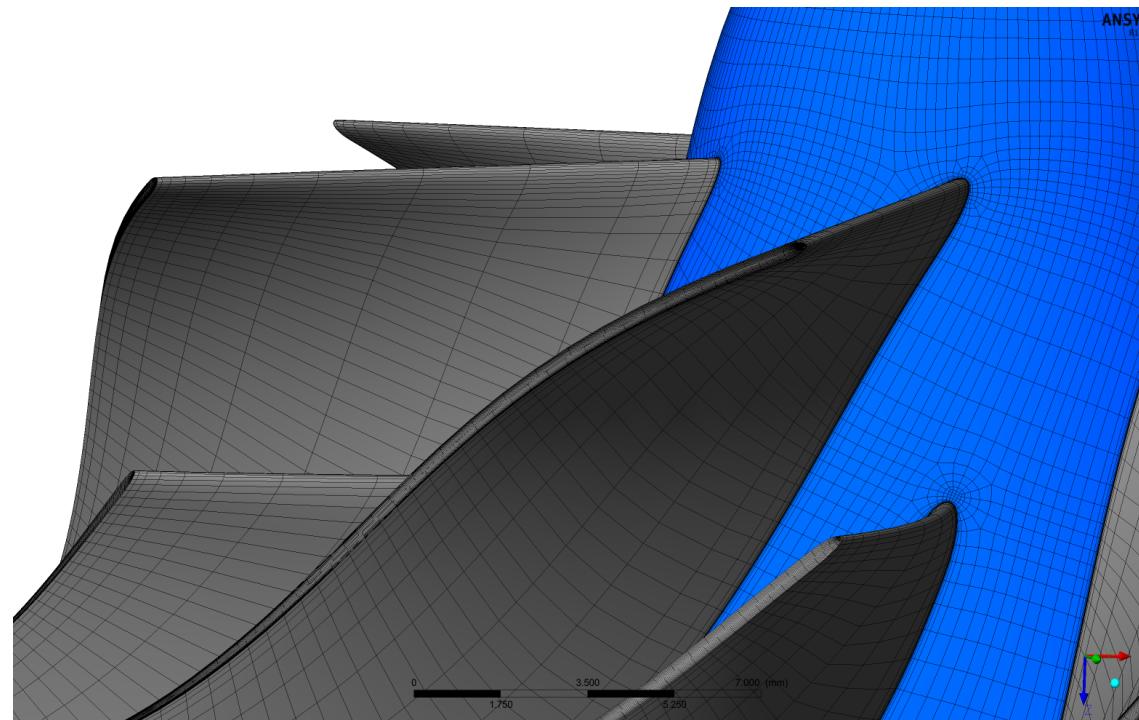
四面体

# of Nodes	Blade Y+	Meshing Tool	Meshing Method	Meshing Time	Mesh File Size	Min Angle	Min Quality
0.143m	8	ICEM CFD	Octree	~5 min	56.7MB	0.65	0.01
1.08m	4	ICEM CFD	Octree	~30 min	601MB	0.31	0.0029
7.50m	2	ICEM CFD	Octree	~1.5 hr	4.4GB	0.23	1.3e-06

# 涡轮增压器分析典例

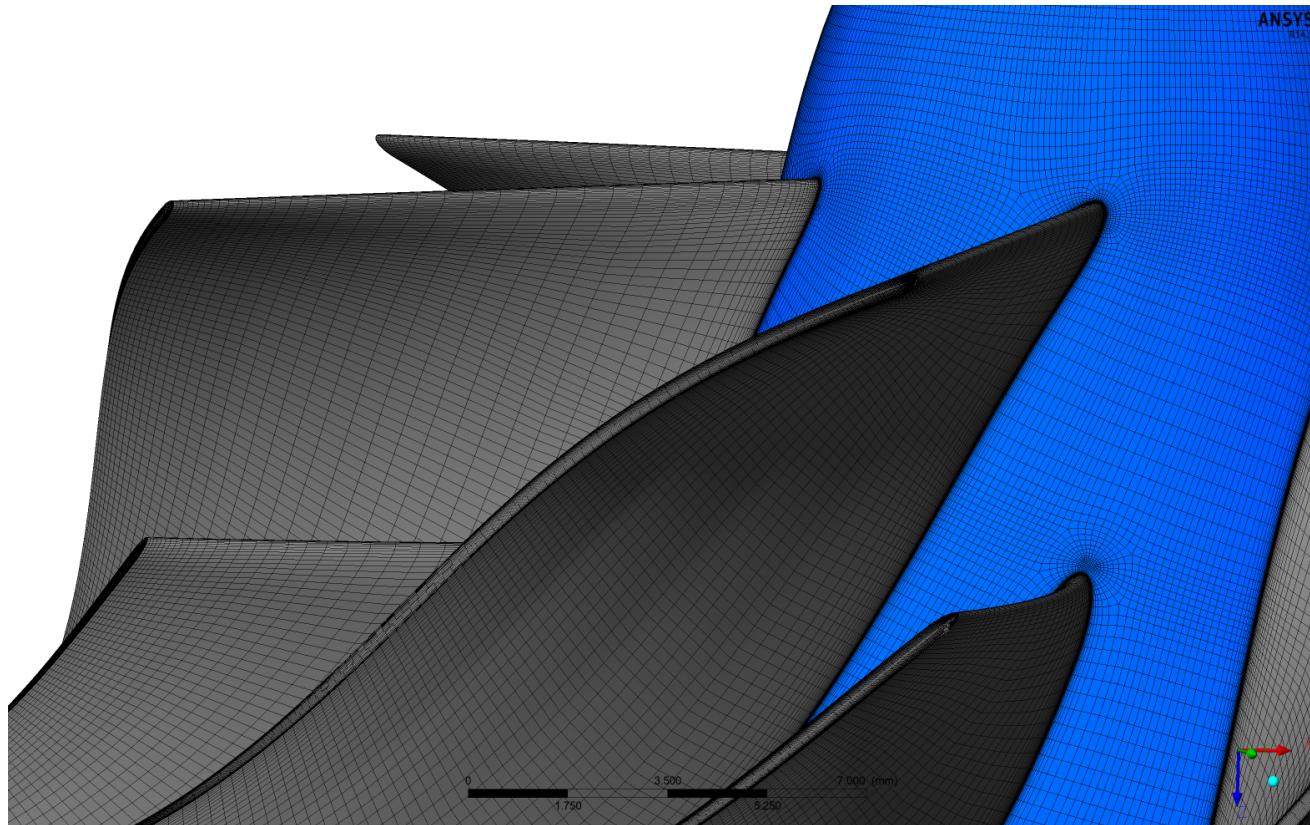
单纯叶轮分析：

叶轮粗网格



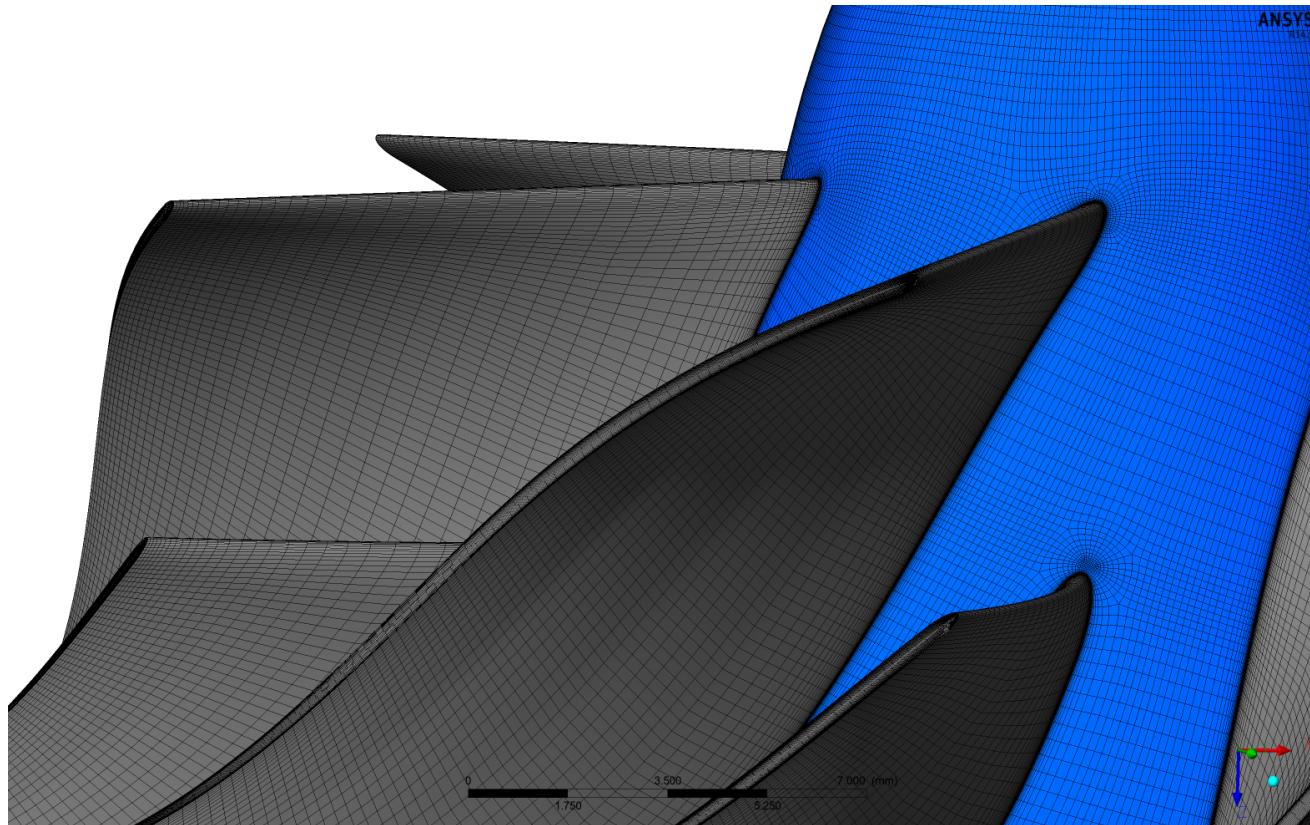
# 涡轮增压器分析典例

## 单纯叶轮分析： 叶轮中等密度网格



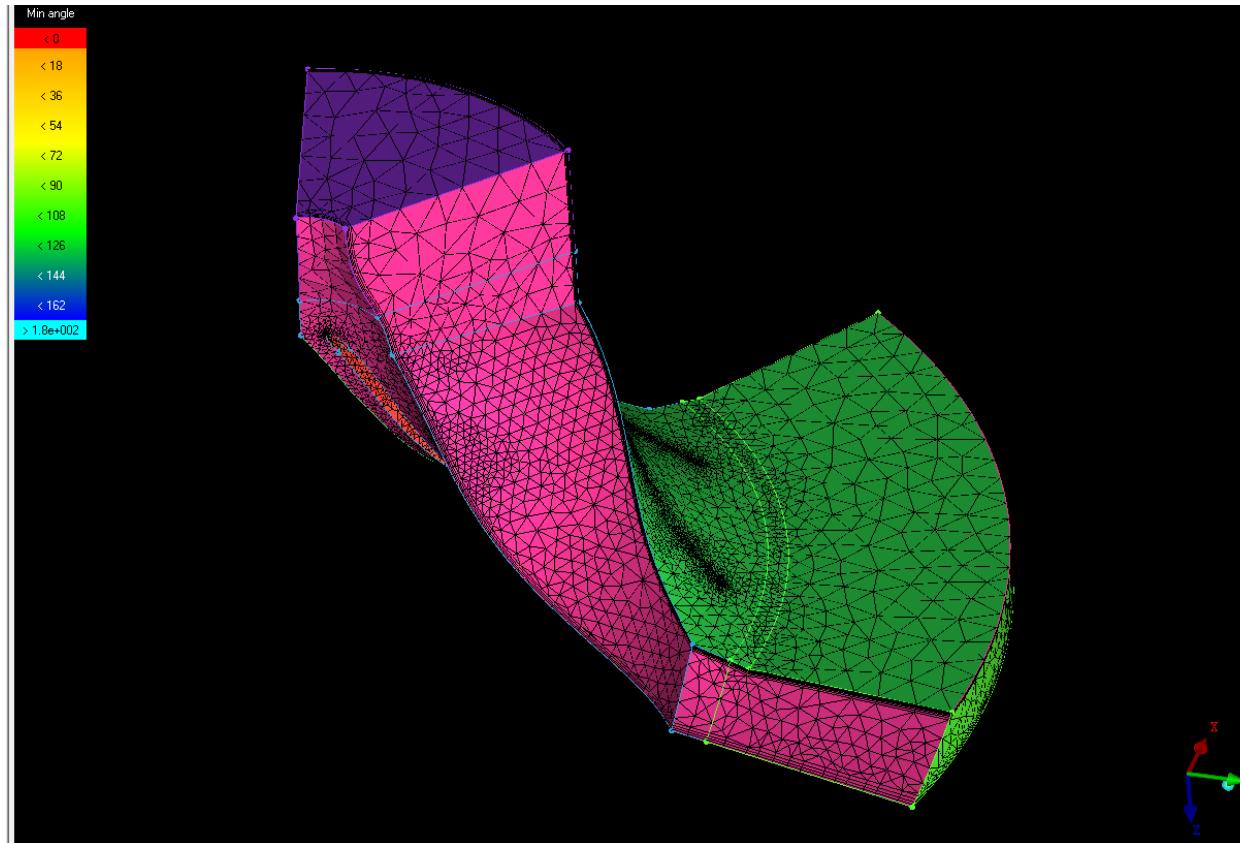
# 涡轮增压器分析典例

## 单纯叶轮分析： 叶轮细化的网格



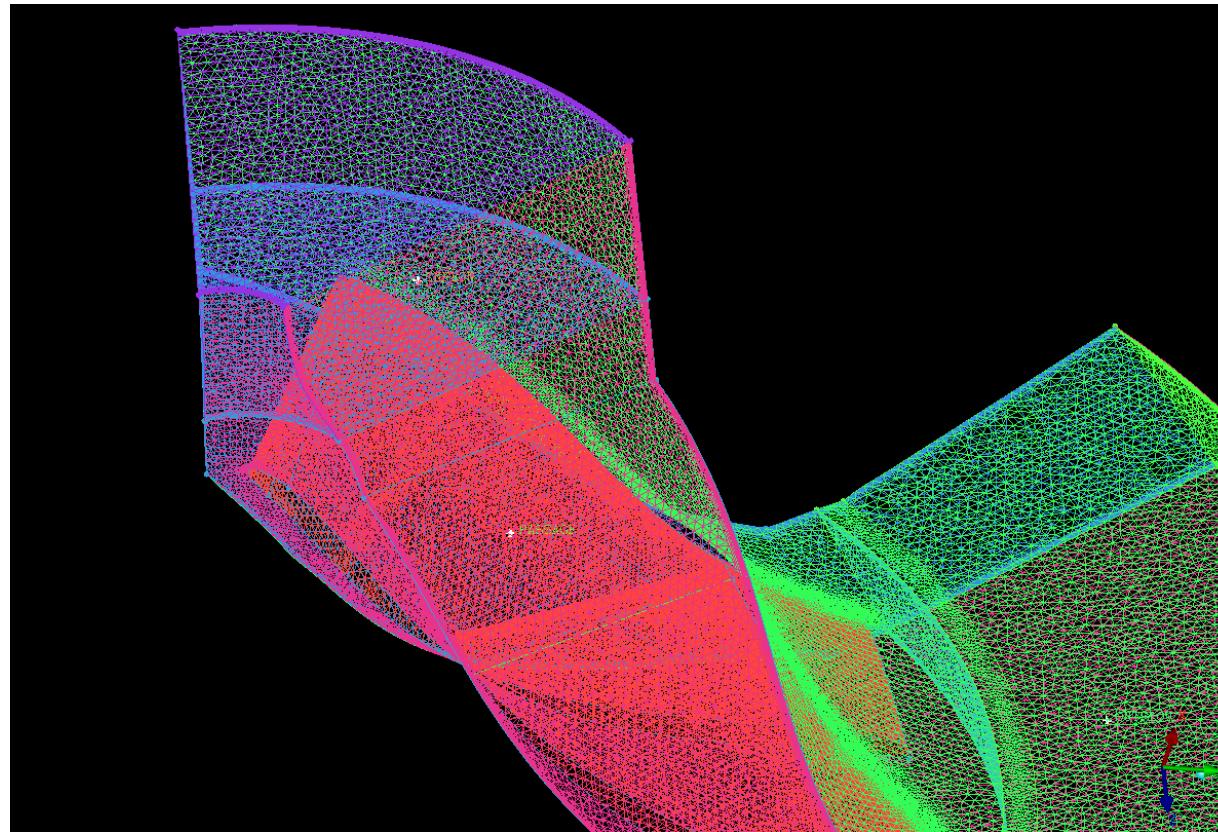
# 涡轮增压器分析典例

## 单纯叶轮分析： 粗密度的四面体网格



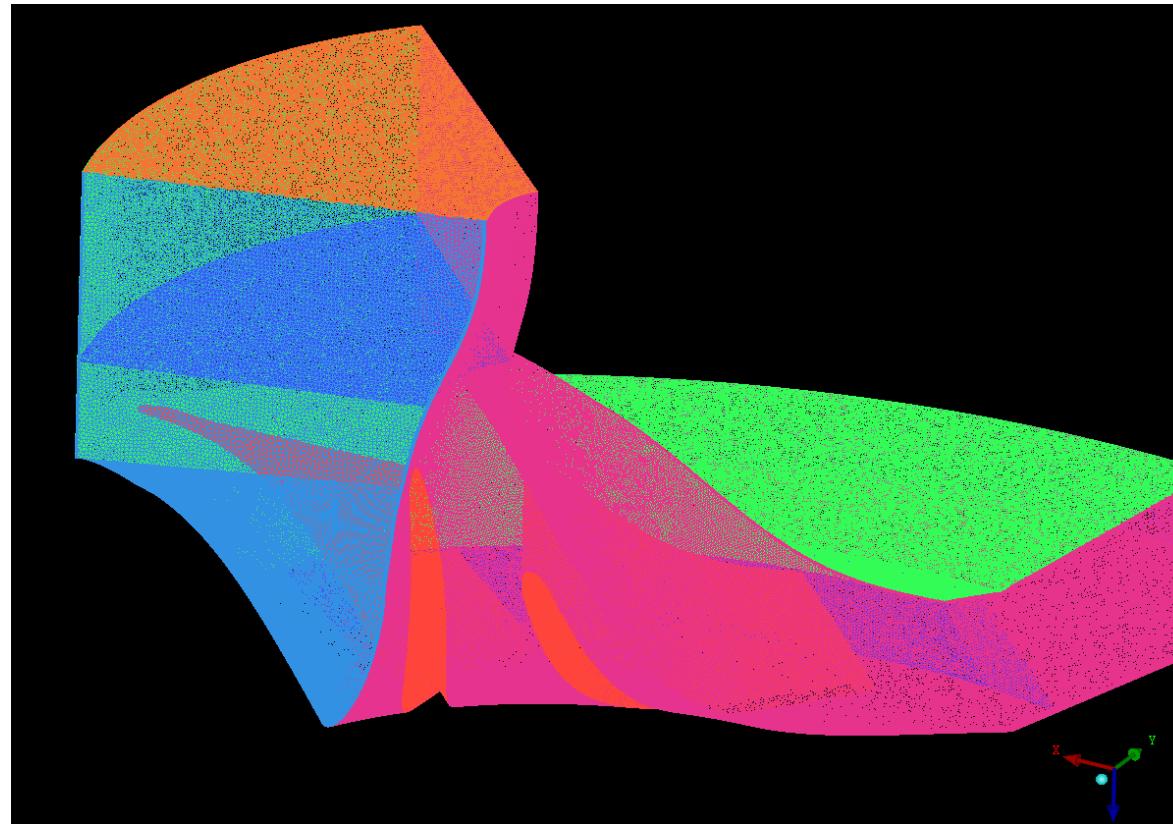
# 涡轮增压器分析典例

单纯叶轮分析：  
中等密度的四面体网格



# 涡轮增压器分析典例

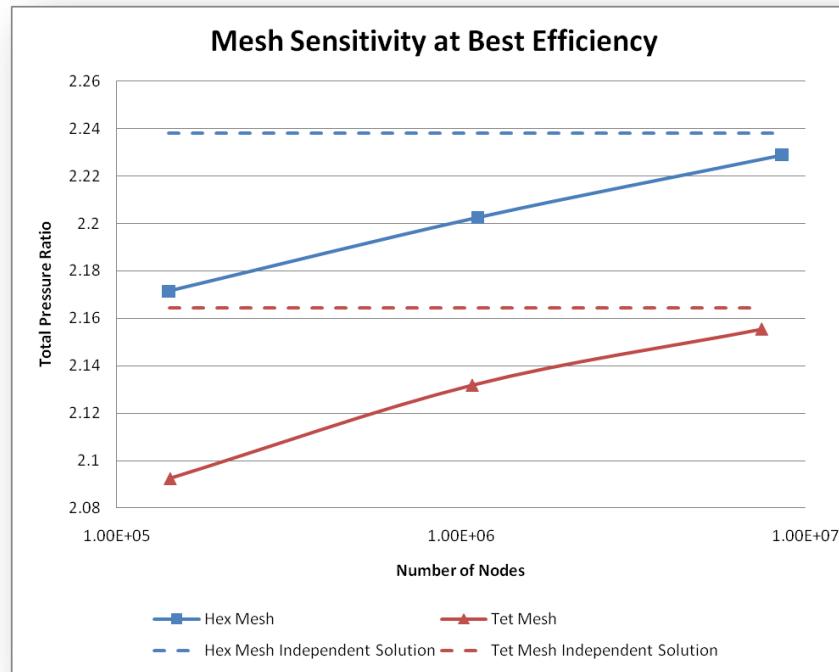
单纯叶轮分析：  
细化的四面体网格



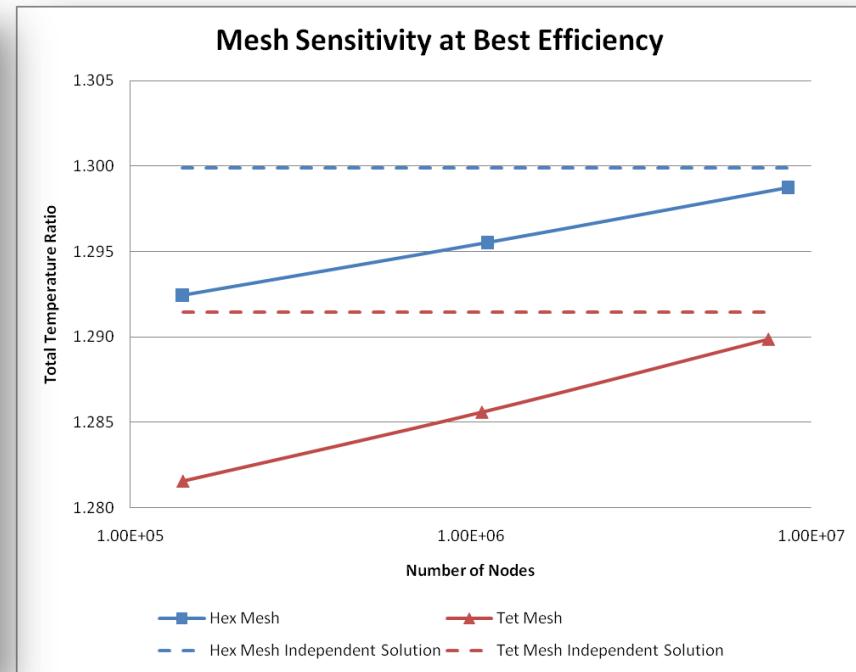
# 涡轮增压器分析典例

## 单纯叶轮分析： 六面体和四面体的网格无关性

总压



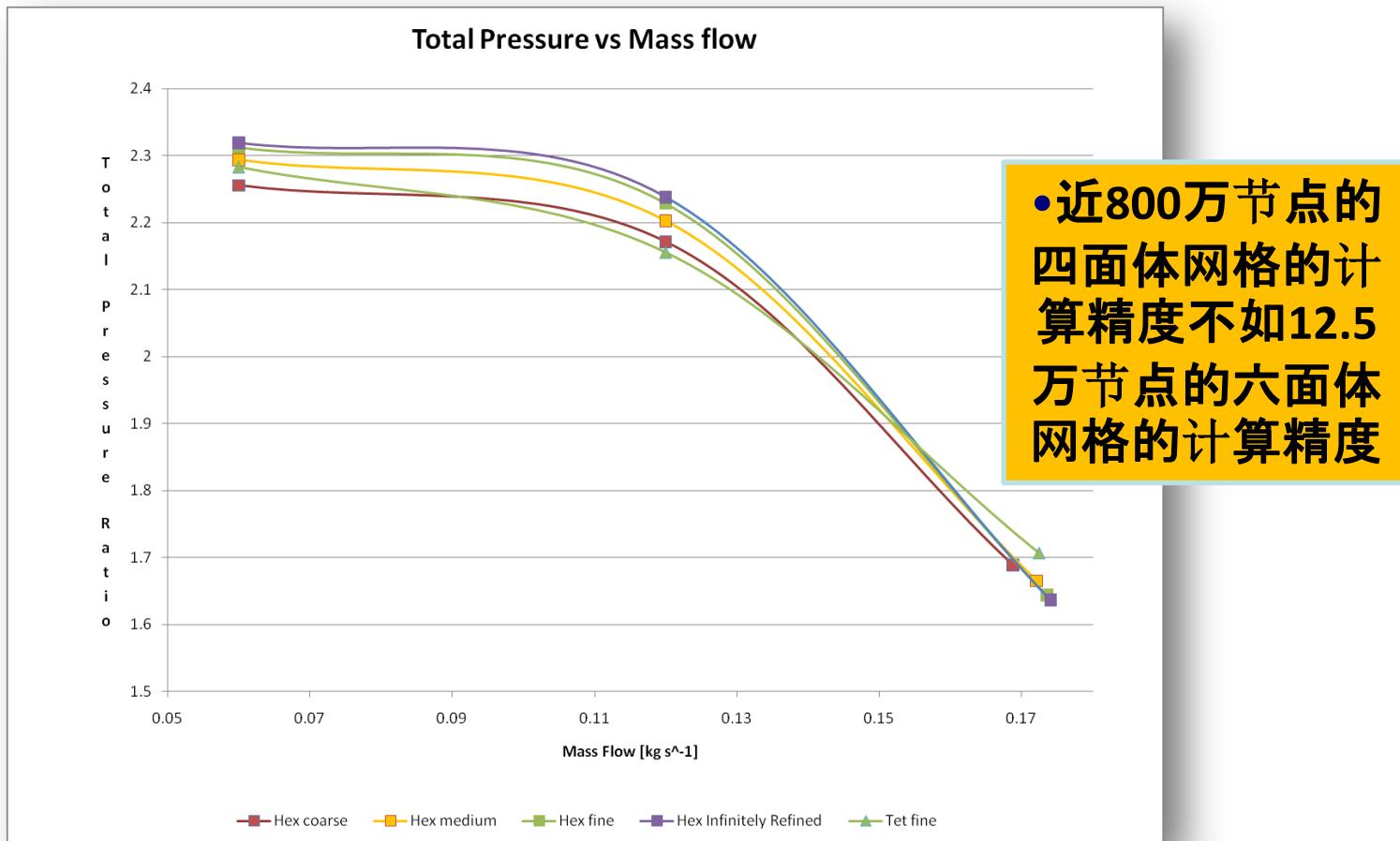
总温



近800万节点的四面体网格的计算精度不如12.5万节点的六面体网格的计算精度

# 涡轮增压器分析典例

单纯叶轮分析： 网格的敏感性比较： 细化的四面体网格与粗密度、 中等密度和细化六面体



# 涡轮增压器分析典例

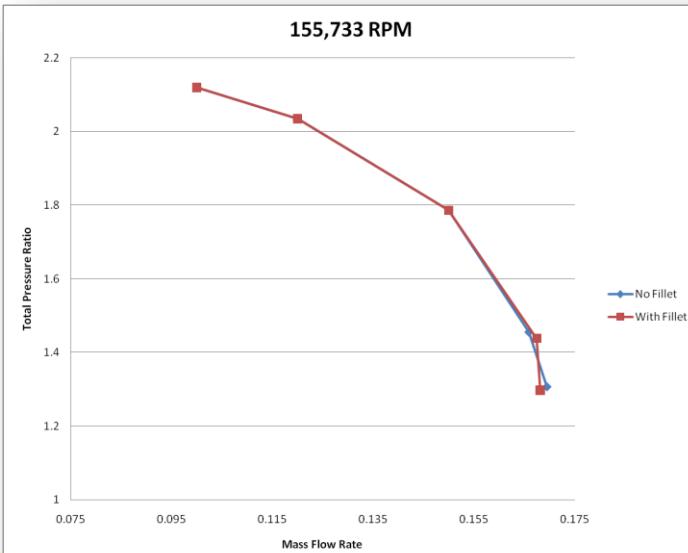
## 单纯叶轮分析：

### 倒圆影响研究：对压比和效率的影响

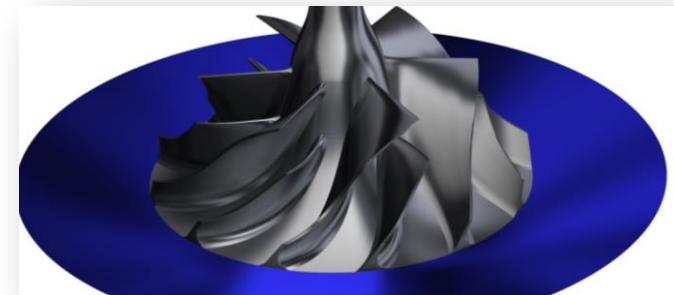
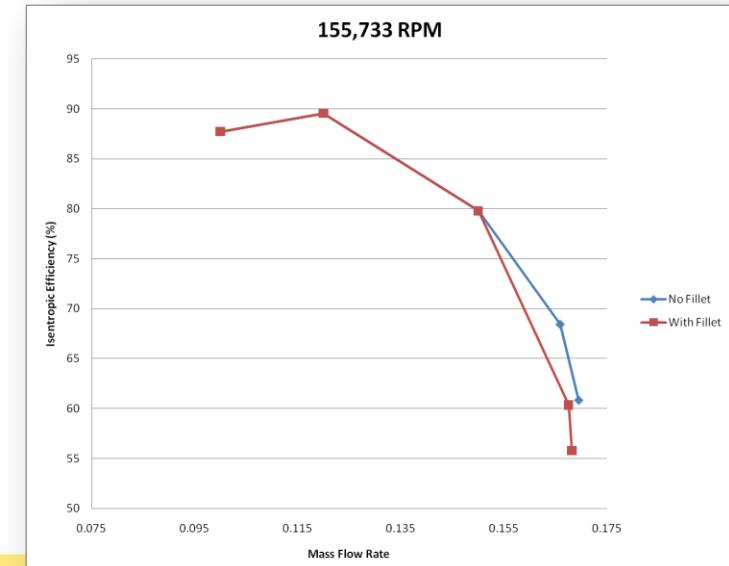
在主叶片和分流叶片根部倒圆半径1.5 mm

- 叶尖宽度约 4.5 mm
- 倒圆叶片和非倒圆叶片比较

## 总压比



## 等熵效率



# 涡轮增压器分析典例

---

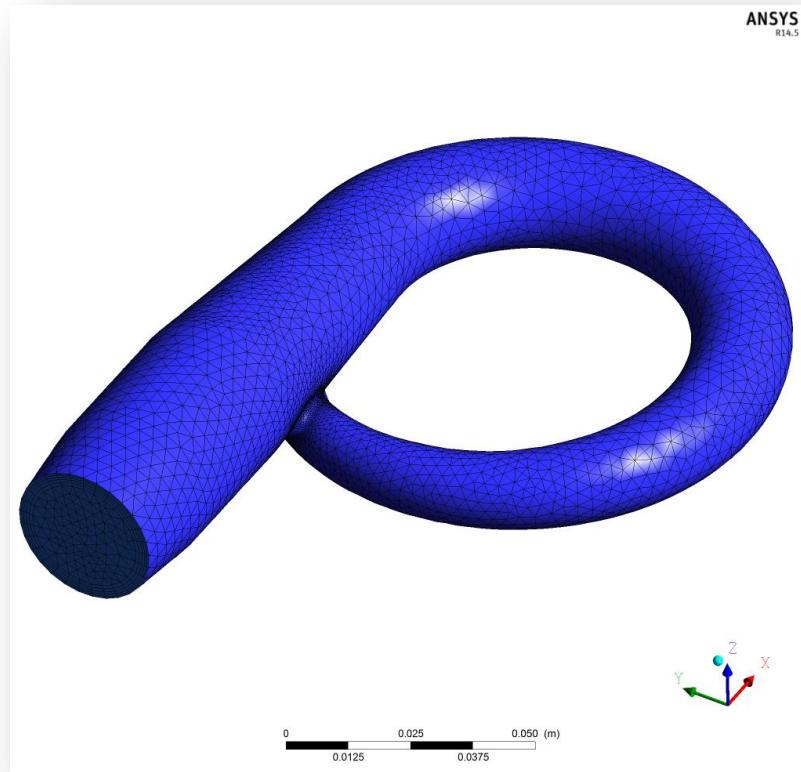
## 部件分析：

- 用什么方法对多大的模型进行分析?
  - 叶轮-扩压器-涡壳?
  - 稳态, 瞬态?
- 为了比较, 做以下工作:
  - 单级分析--- 一个叶轮与完整的涡壳
  - “冻结转子” --- 全360度
  - 非定常转子/静子--- 全360度

# 涡轮增压器分析典例

## 部件分析：

### 涡壳网格



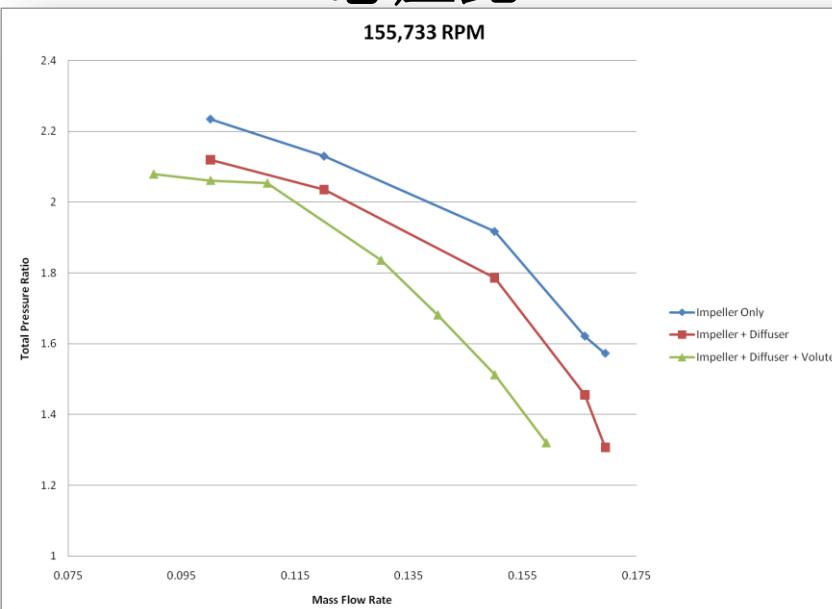
- 相对较粗的网格用于研究
- 网格大小： 370,000 节点
  - 四面体网格 = 1.1 百万
  - 三棱柱网格 = 0.32 百万
- 网格质量统计
  - 平均网格质量 = 0.71
  - 最差网格质量 = 0.046

# 涡轮增压器分析典例

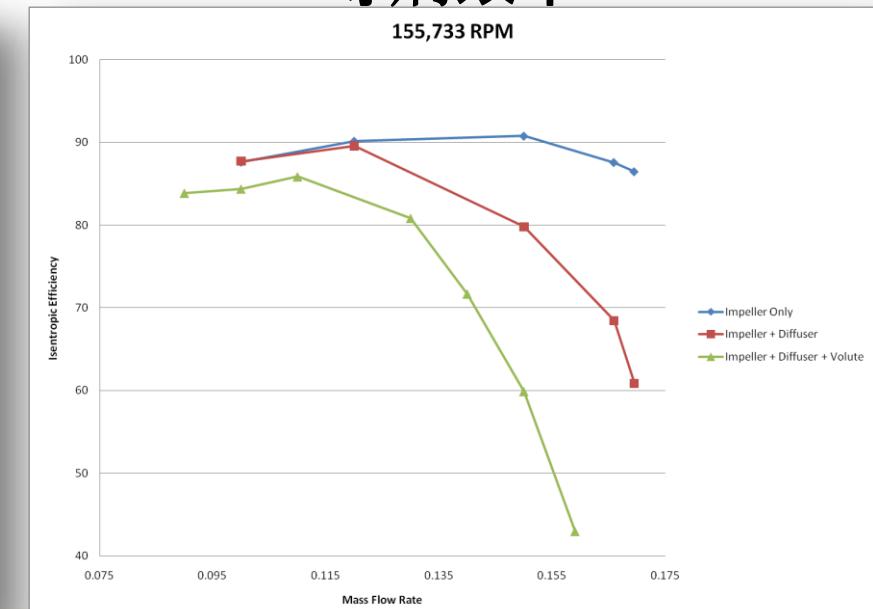
## 部件分析： 增加扩压器和涡壳后的影响

- 比较了三种不同的形状
  - 单纯叶轮（单流道）
  - 叶轮+无叶扩压器（单流道）
  - 叶轮+无叶扩压器+涡壳（全360度，冻结转子）

### 总压比



### 等熵效率



# 涡轮增压器分析典例

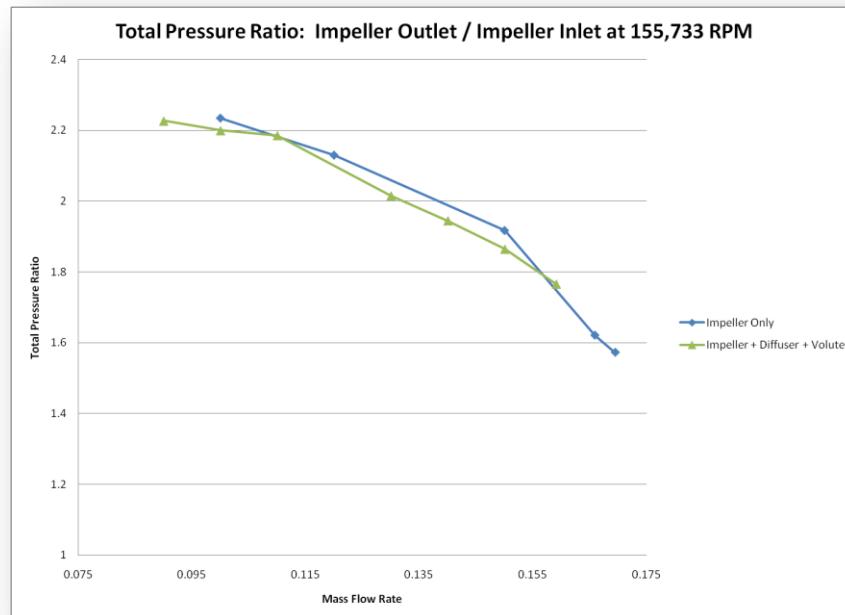
## 部件分析： 叶轮性能

- 从两种几何构型关注叶轮的性能
  - 单纯叶轮模拟
  - 叶轮-扩压器-涡壳模拟
- 叶轮性能相似，而不受叶轮下游所谓几何形状的影响
  - 总压比 = (叶轮出口总压/叶轮入口总压)
  - 叶轮的等熵效率

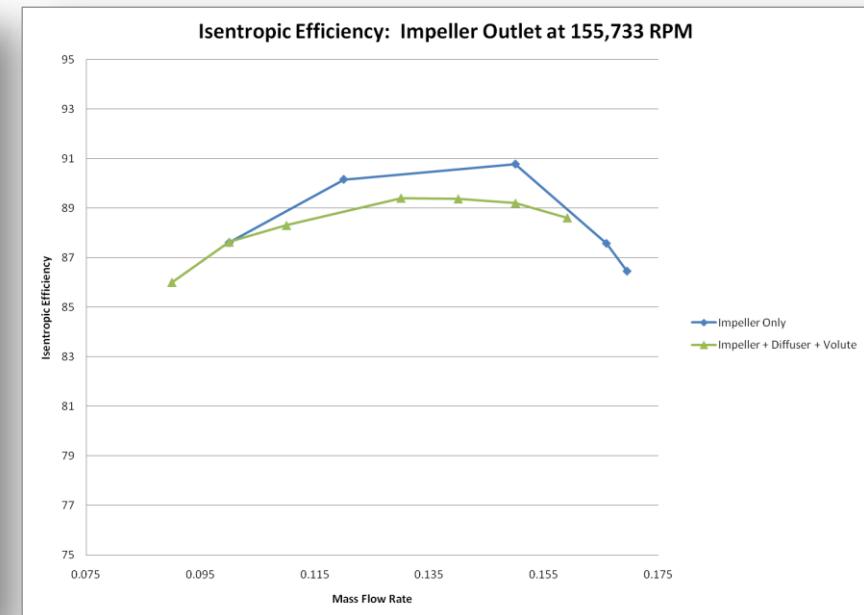
# 涡轮增压器分析典例

## 部件分析： 两种几何构型的叶轮压比预测的影响

叶轮总压比



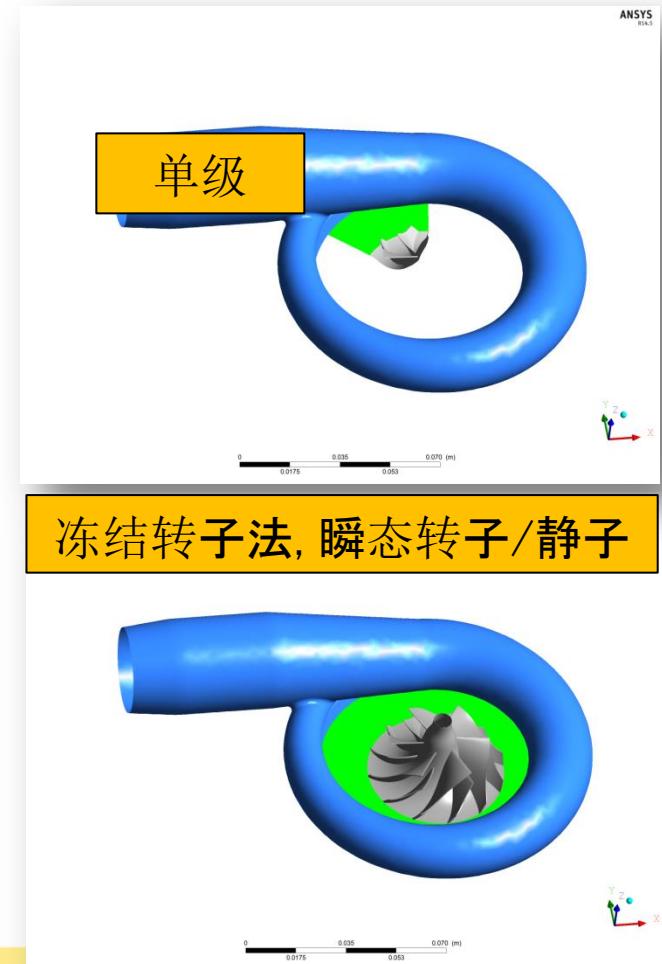
叶轮等熵效率



# 涡轮增压器分析典例

## 部件分析： 动-静交接面的影响

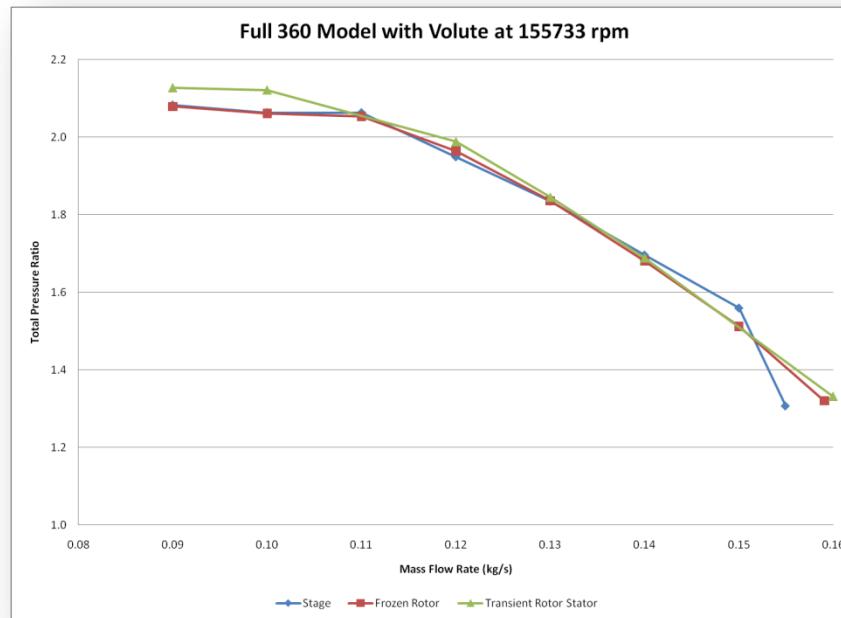
- 比较扩压器和涡壳三种交接面类型
  - 单级 (叶轮/扩压器单流道, 全涡壳)
  - 冻结转子 (全360度)
  - 瞬态转子/静子
- 对所有算例
  - 在转动坐标系内模拟叶轮和无叶扩散器流动
  - 在静子坐标系下模拟涡壳流动



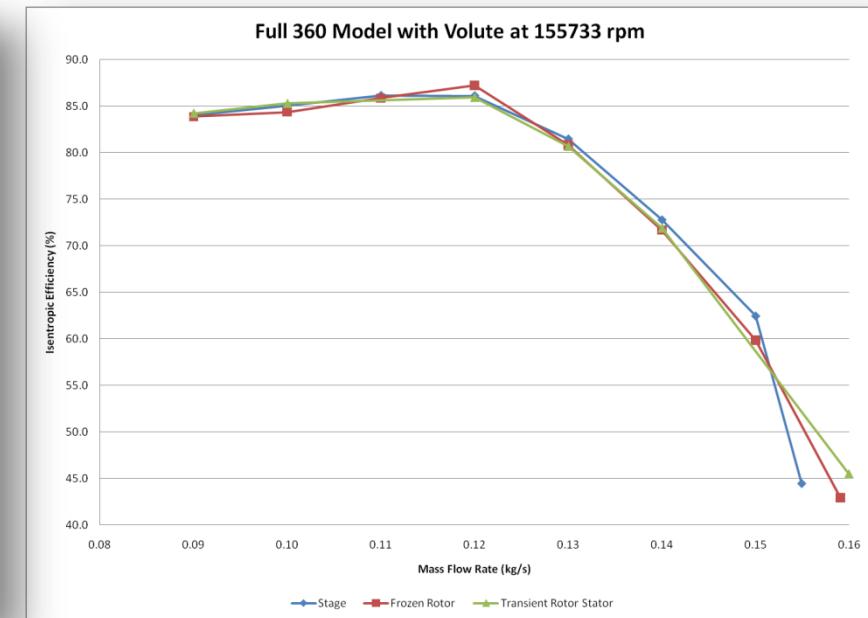
# 涡轮增压器分析典例

## 部件分析： 交接面类型对总压预测的影响

### 总压比



### 等熵效率



蓝色为单级交接面, 红色为冻结转子, 绿色为瞬态转子/静子

# 涡轮增压器分析典例

## 后处理：

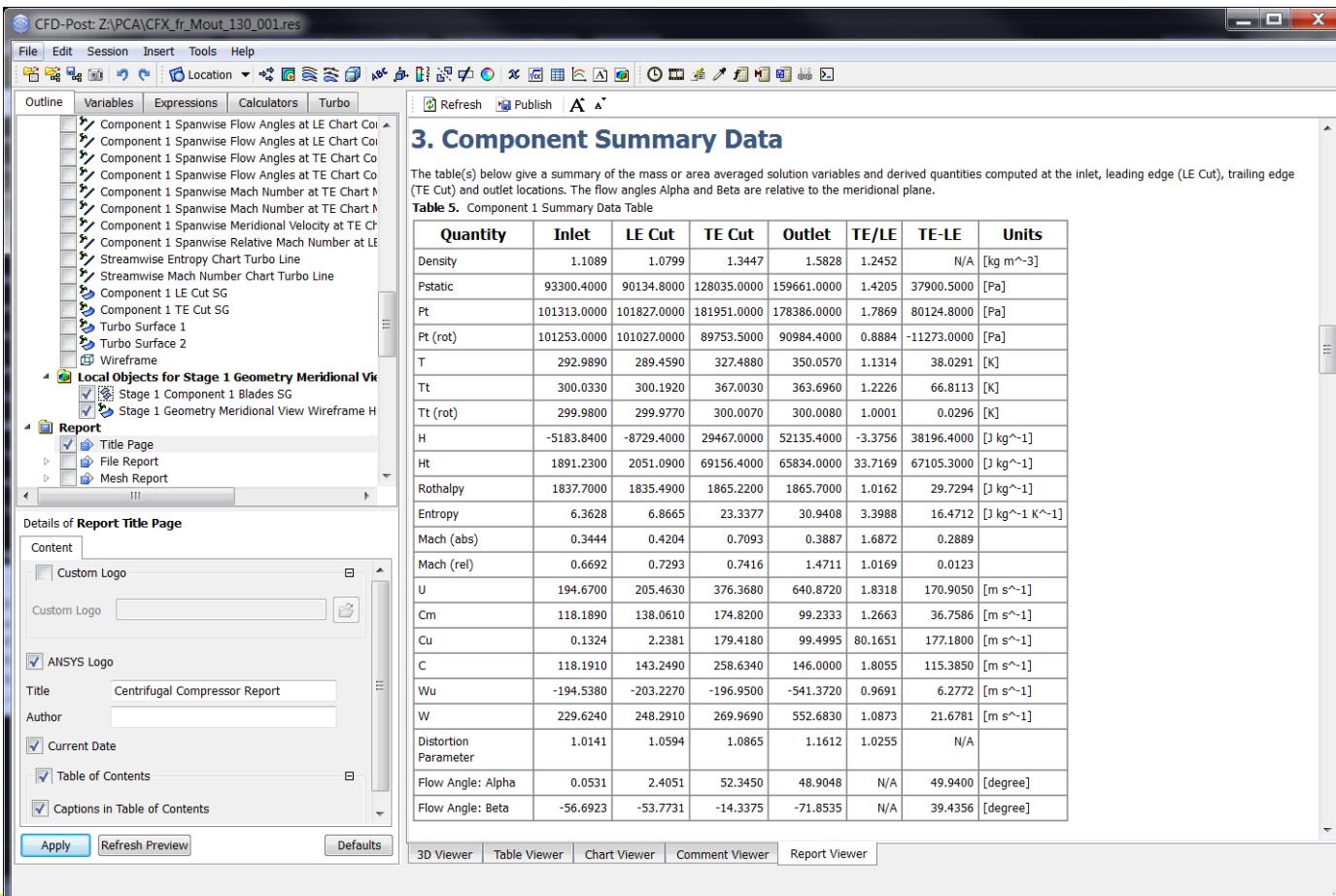
- 准备工作：
  - 确保计算是收敛的！
    - 计算了足够多的时间步！
- 定量参数
  - 涡壳
    - 总压、总温、流动角度、等熵效率
    - 畸变因子
    - 叶片载荷
  - 涡壳：恢复因子，损失系数
  - 网格无关性解的估计
- 定性
  - 叶片对叶片和子午面平均
  - 叶轮出口展开图

# 涡轮增压器分析典例

## 后处理：

### CFD 结果

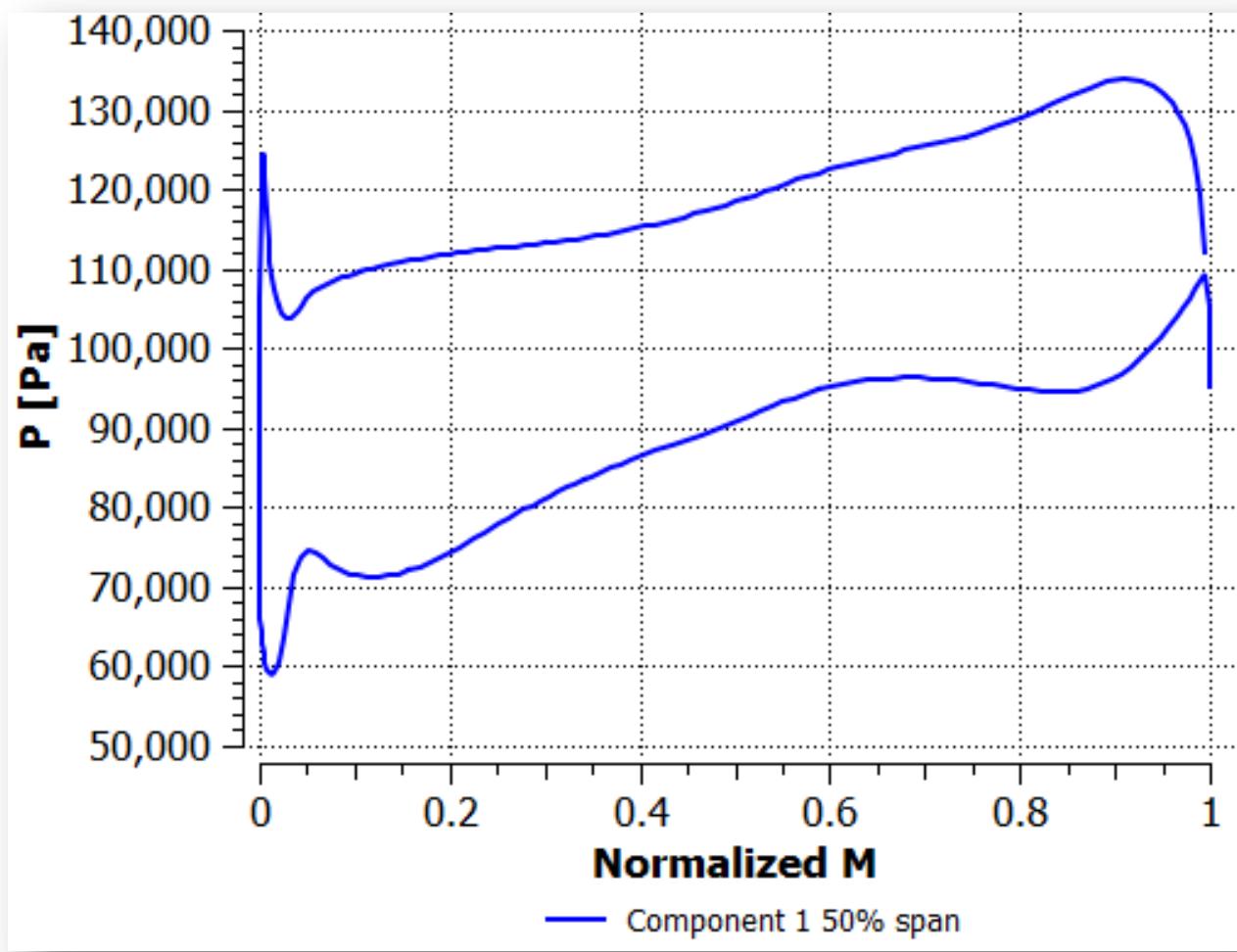
- 在CFD Post中检查压缩机报告结果



## 涡轮增压器分析典例

后处理:

Mass flow = 0.13 kg/s的叶片载荷图

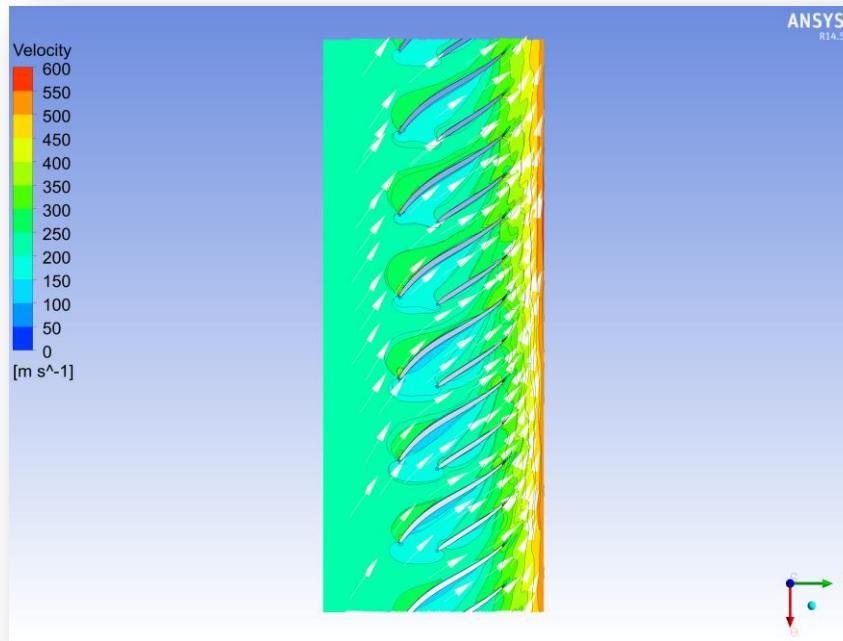


# 涡轮增压器分析典例

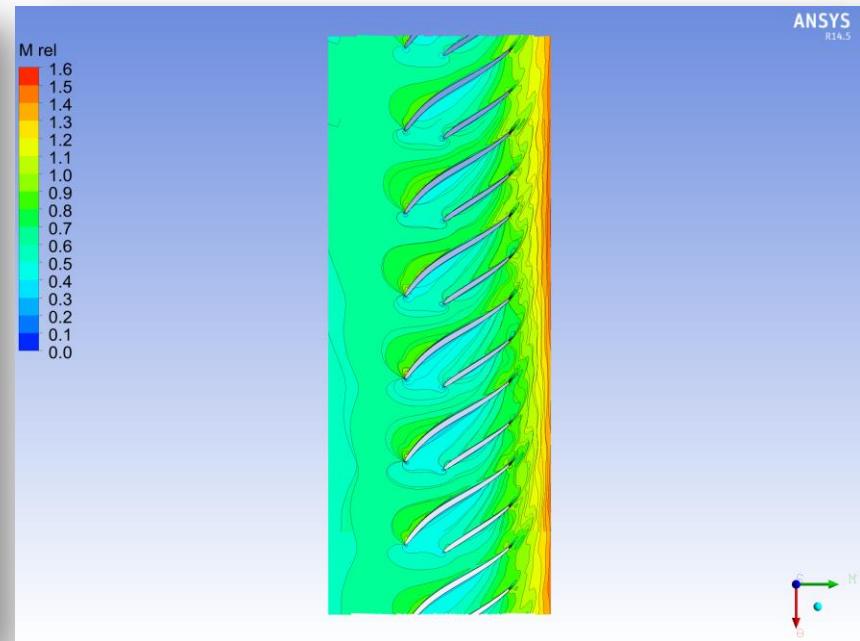
## 后处理:

Mass flow = 0.13 kg/s 叶片-叶片图

50% 展高的速度图



50%展高的相对马赫数图

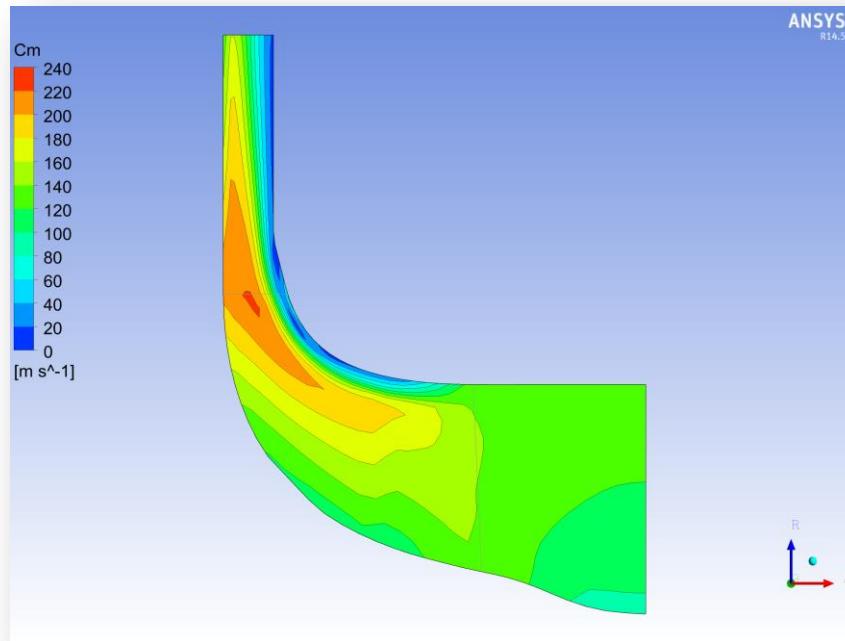


# 涡轮增压器分析典例

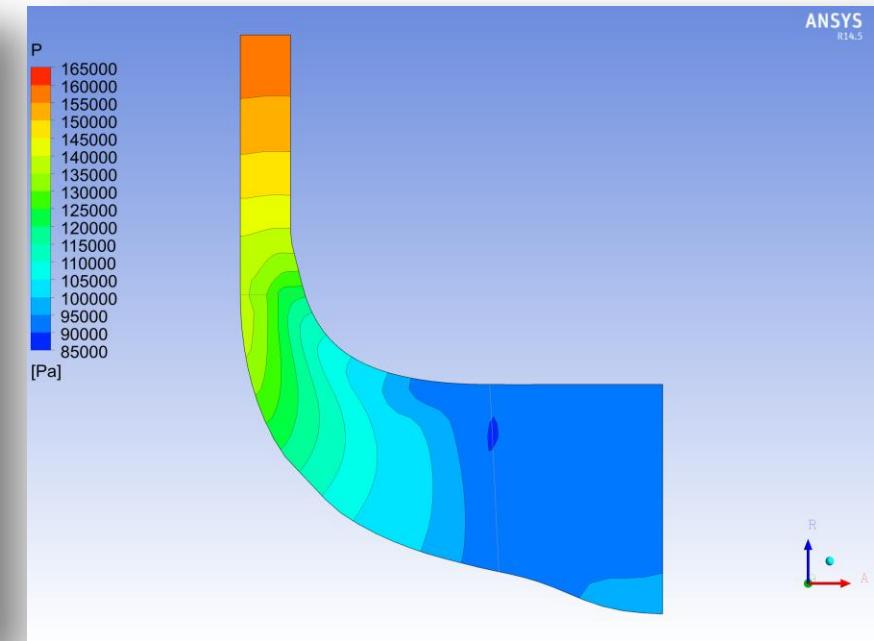
## 后处理：

Mass Flow = 0.13 kg/s的子午面图

周向平均的子午面速度图



周向平均的静压分布



## 总结

ANSYS 提供了完整涡轮增压器设计和分析平台

- 几何建模
- 通流计算
- 网格划分
- 流体动力学计算
- 后处理
- 优化

