

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



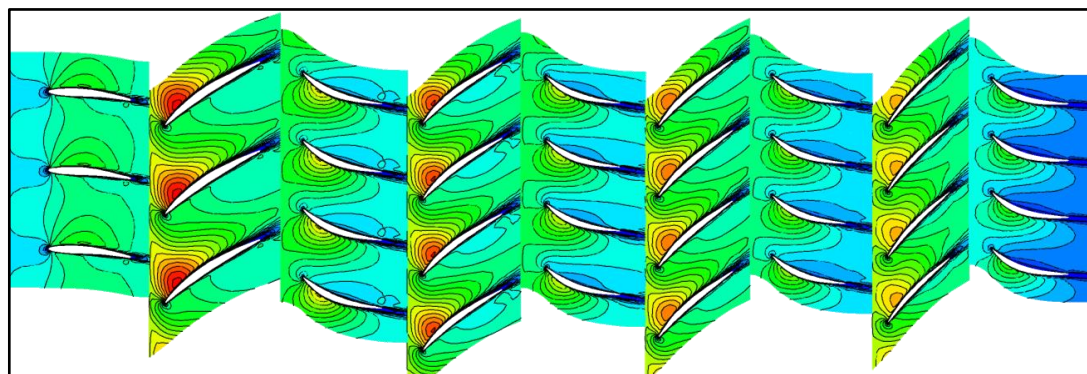
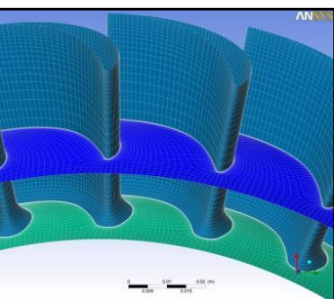
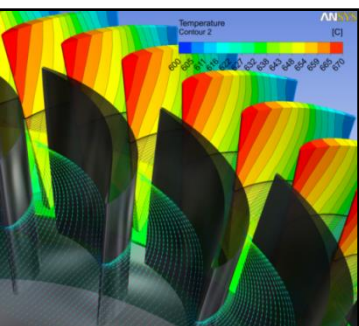
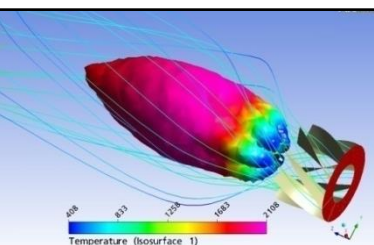
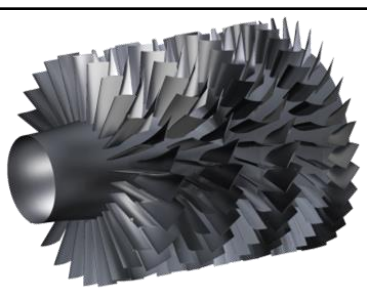
主要内容

- **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

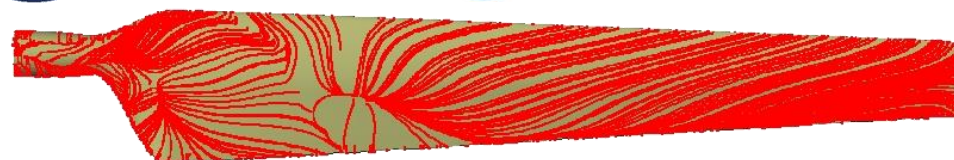
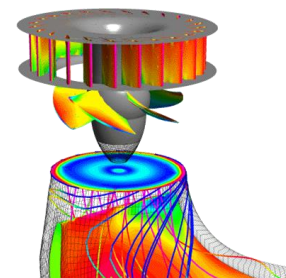
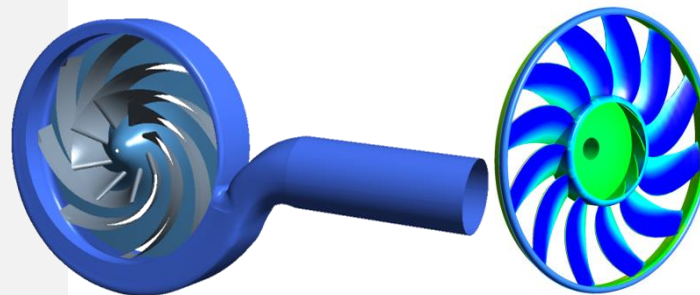
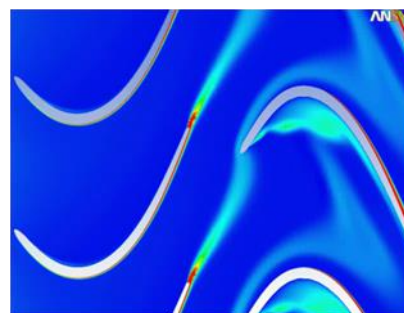
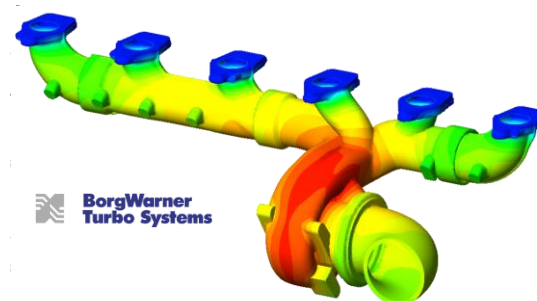
整机模拟

- 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

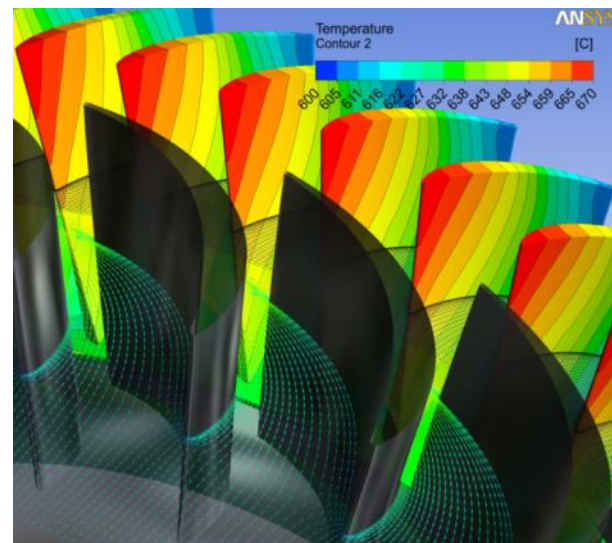
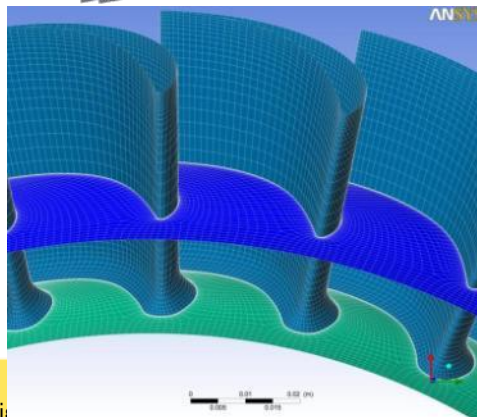
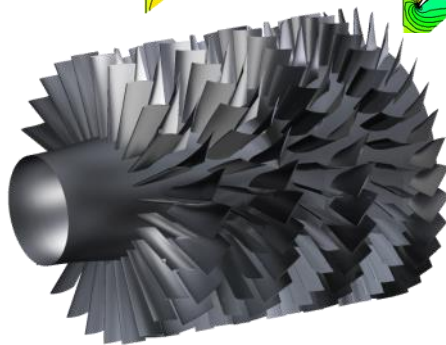
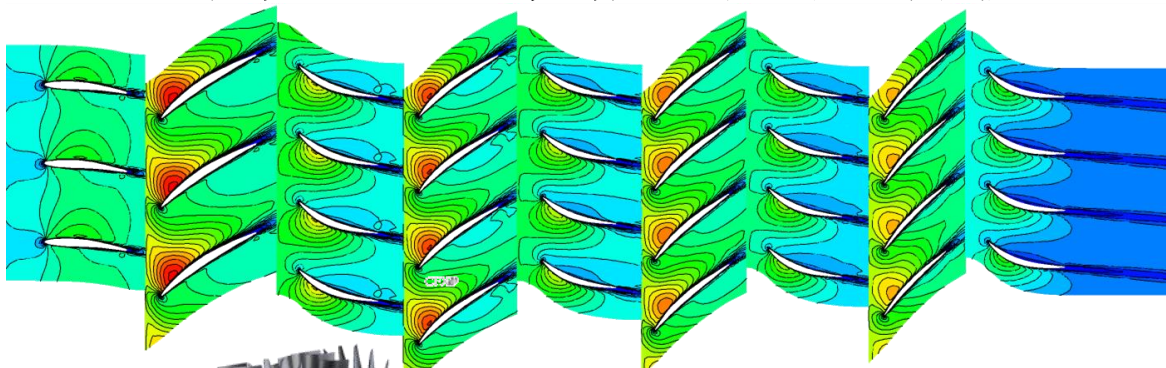
- 轴流和离心压气机
- 轴流和径流透平机（气和蒸汽）
- 离心、混流和轴流泵
- 轴流和径流风扇
- 汽车行业内的透平机械
- 水轮机
- 风力机



ANSYS 的透平设计分析系统

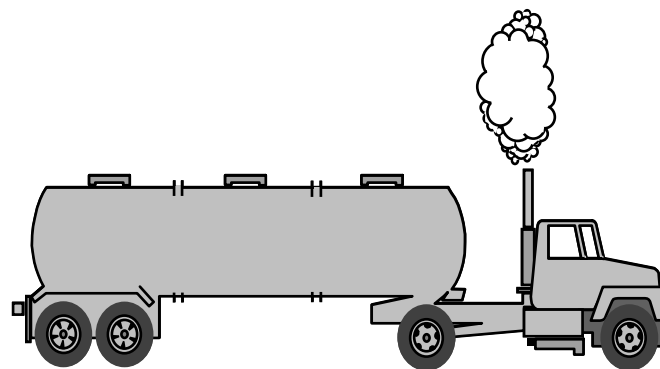
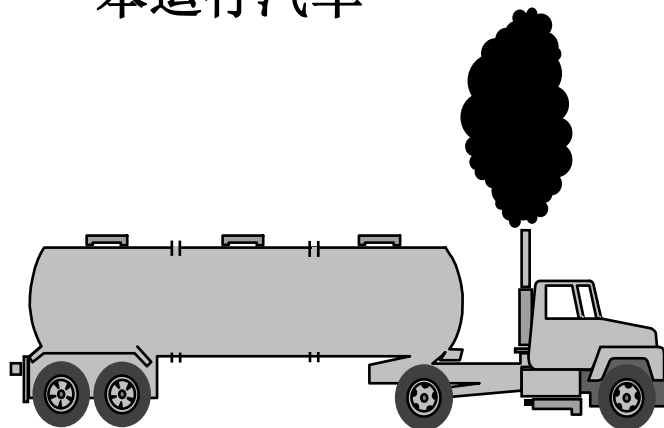
■ 在ANSYS Workbench 平台上进行完整透平机械的设计和分析

- 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

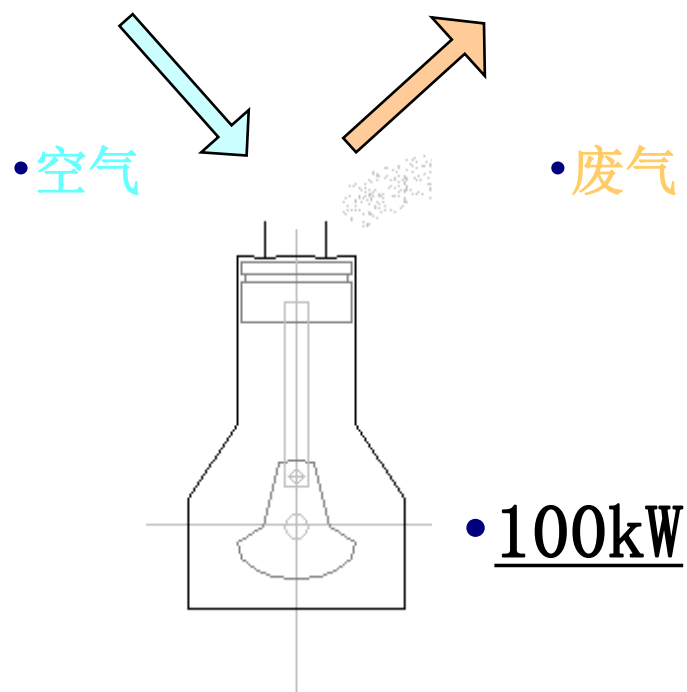
- 汽车工业中涡轮增压器的使用日益增长，增长的动力来自于：
 - 日益苛刻的国家排放标准（国III、IV、V，国VI即将发布）
 - 提高发动机的功率和扭矩，保证燃油汽车燃油经济性，开发低成本运行汽车



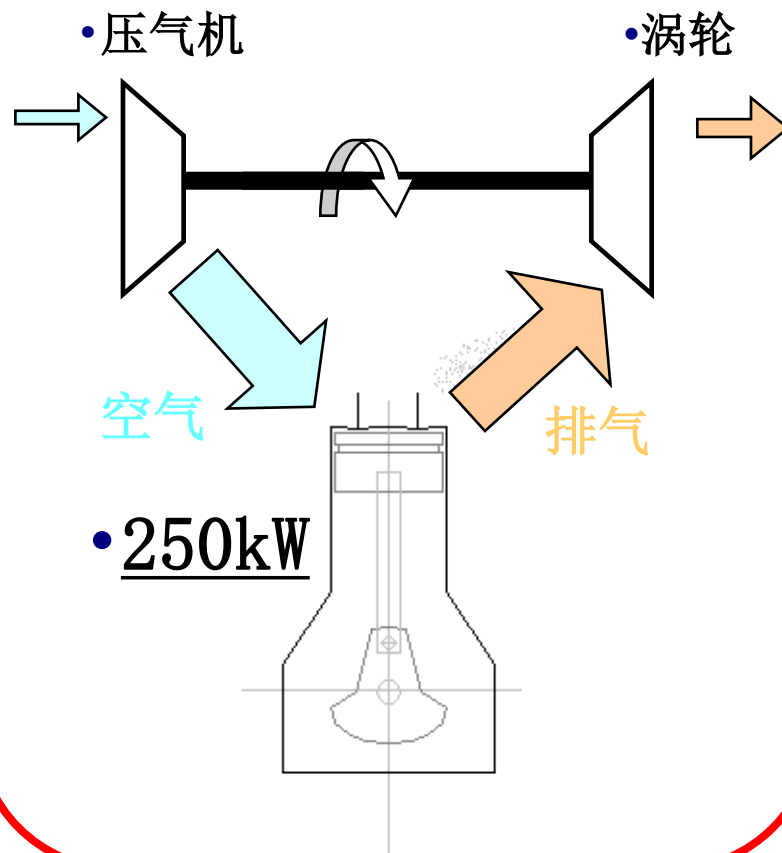
- 涡轮增压器是实现上述目标的重要途径之一
- Honeywell公司曾预测到2025年70%的常规动力汽车将安装涡轮增压器

涡轮增压器的原理和设计要求

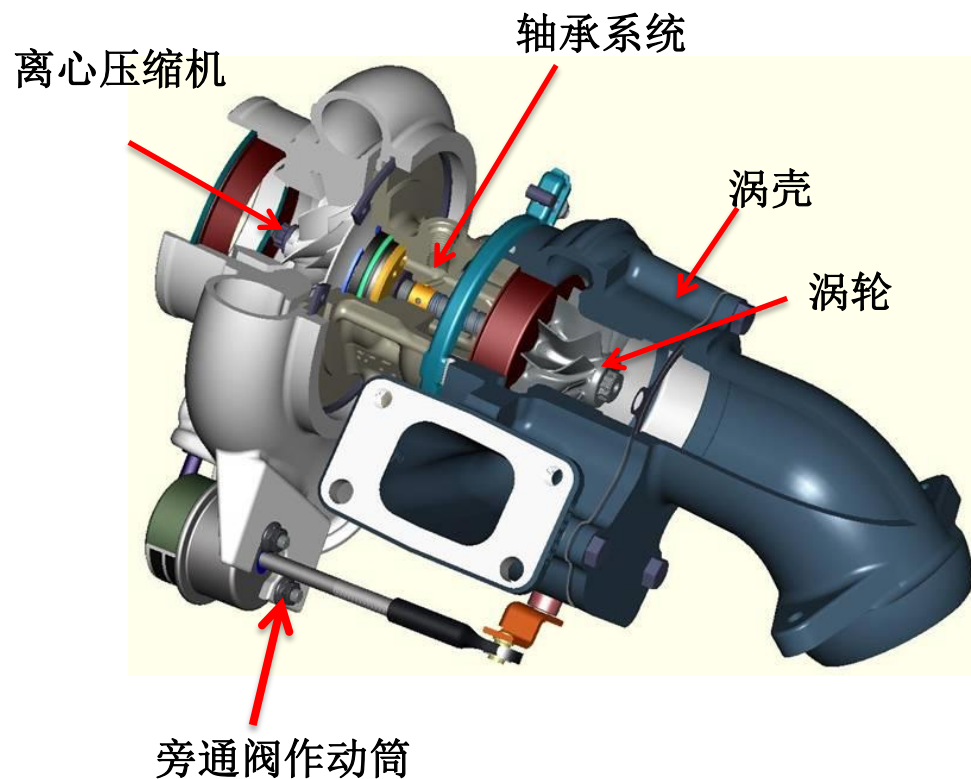
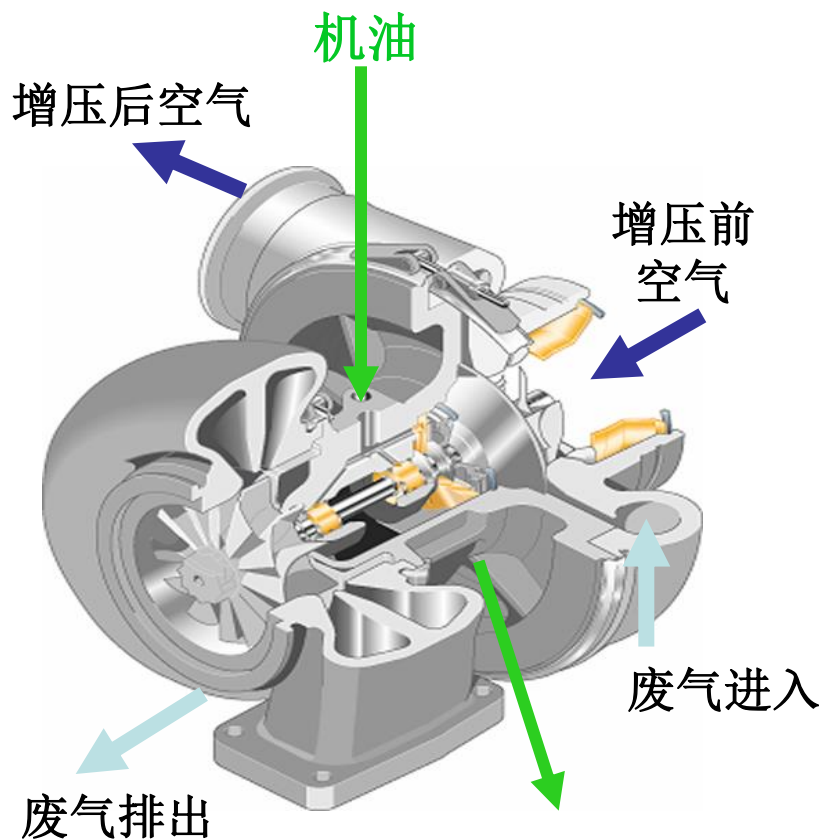
• 自然吸气



• 涡轮增压



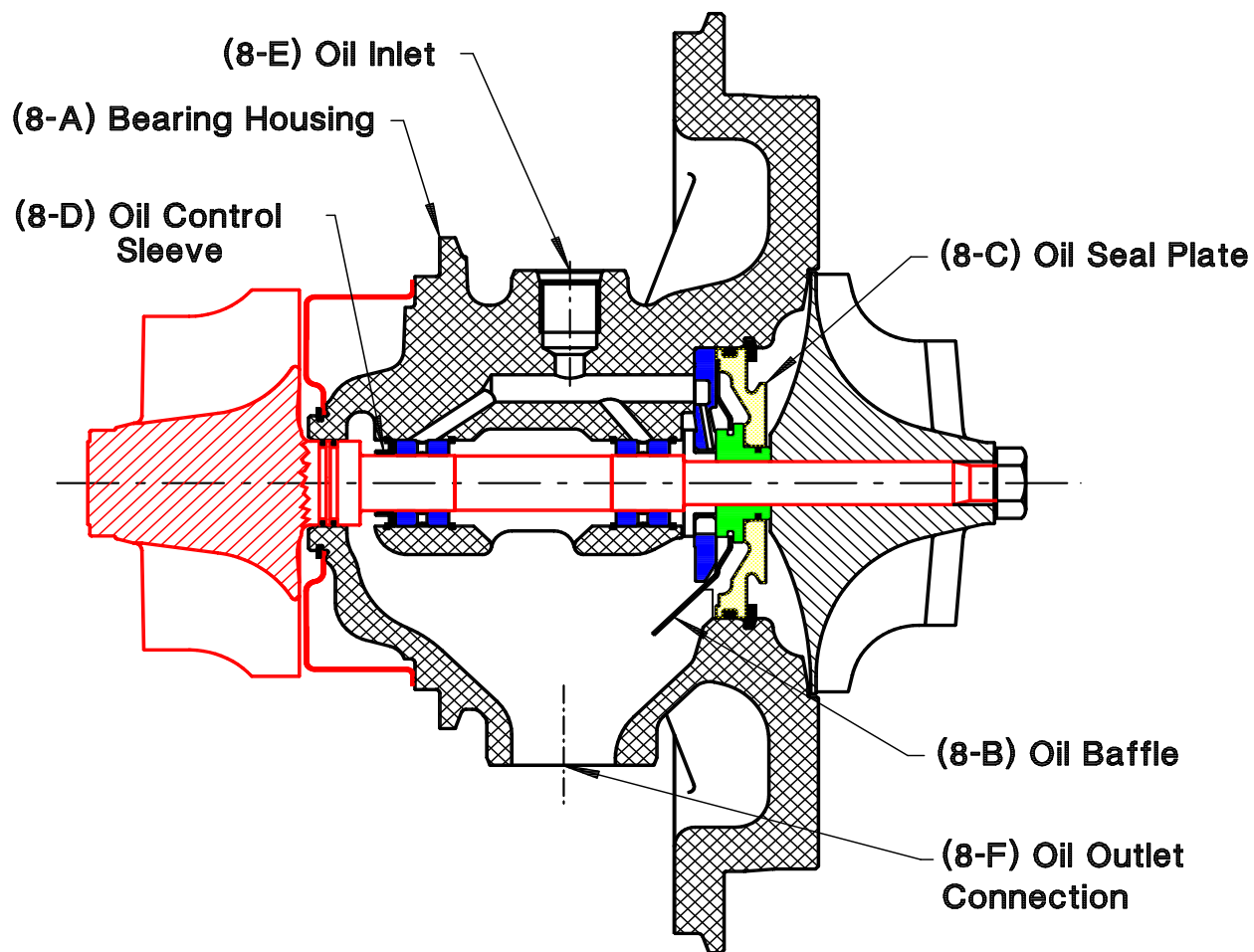
涡轮增压器的原理和设计要求



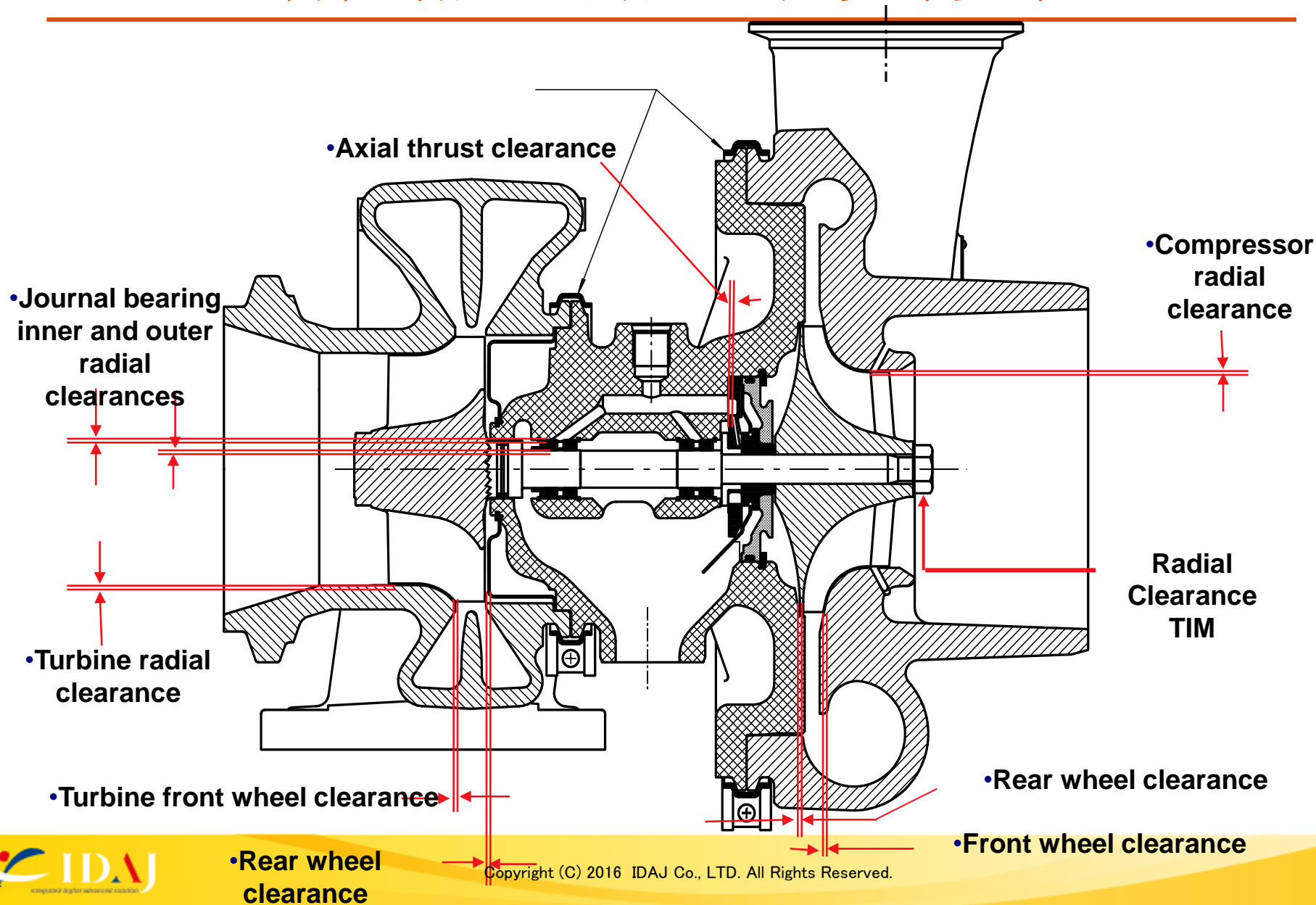
• 压气机内的温度可达 200°

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类型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

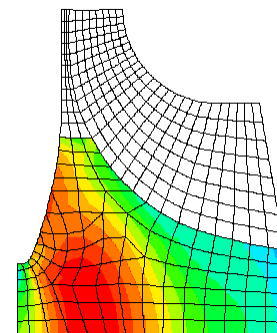
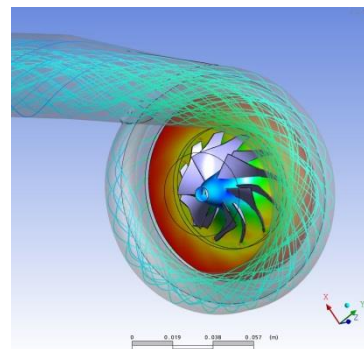
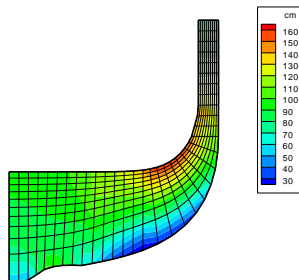
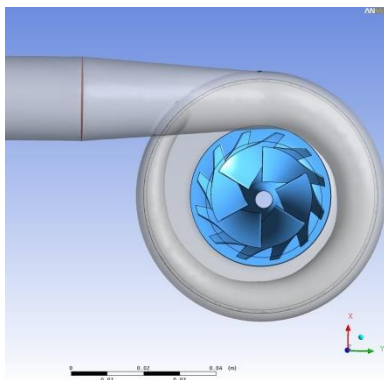
■ 涡轮增压器多学科设计优化涉及的关键技术

- 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

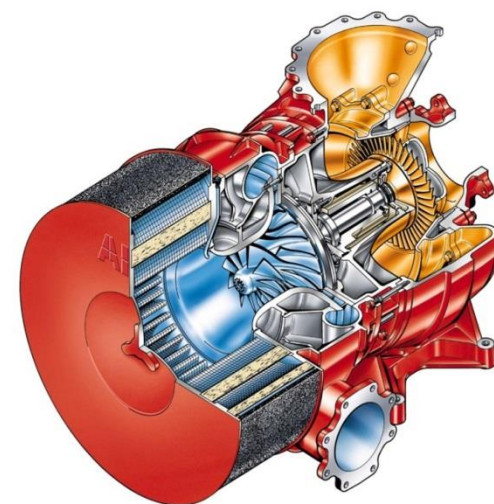
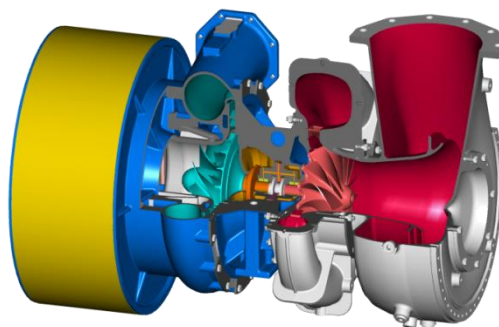
■ 多学科多物理场的计算仿真平台的具体要求



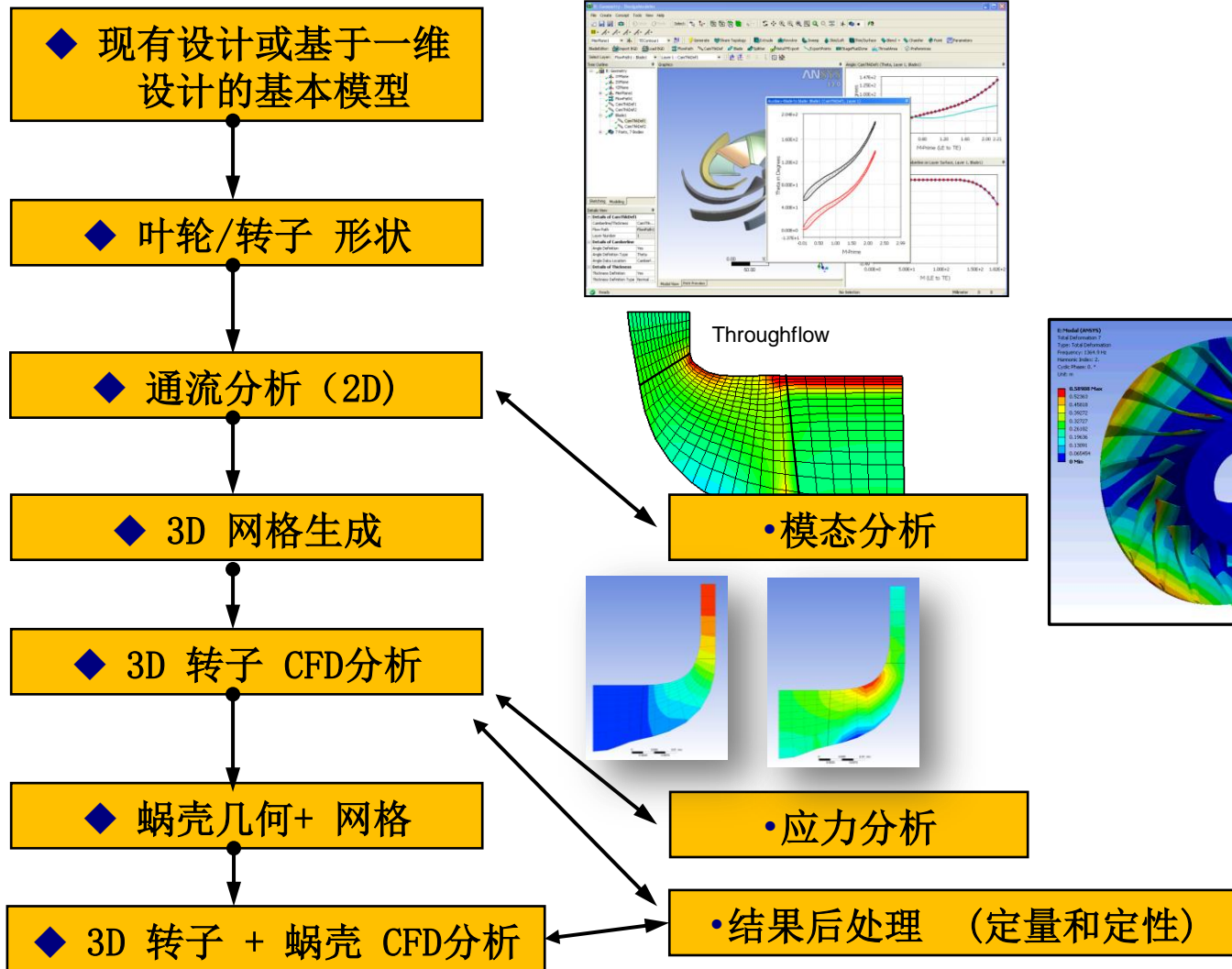
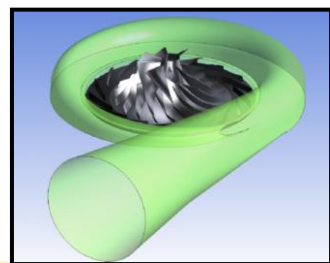
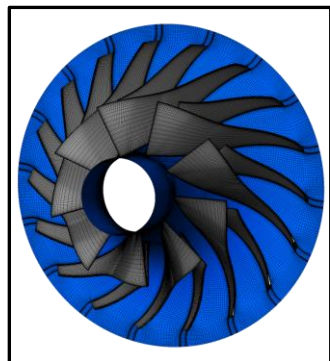
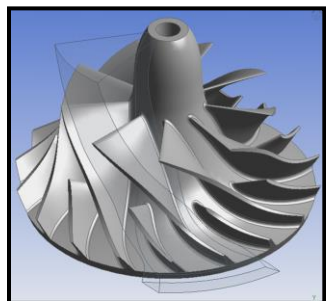
- 具有CAD功能
- 叶轮/转子和涡壳的专业几何建模工具
- 一维的气动力设计工具
- 二维的气动力分析工具

- 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

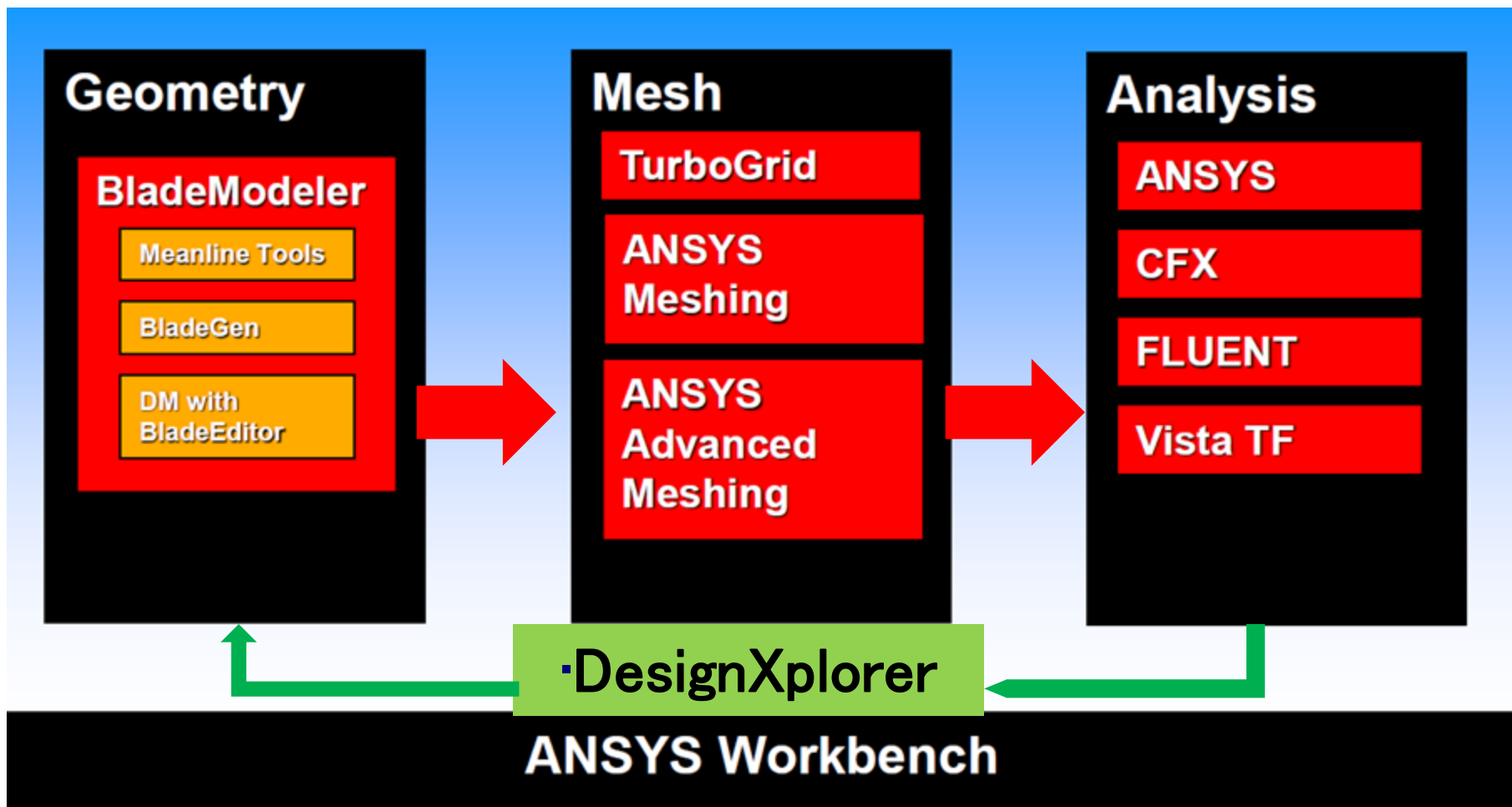


1D-2D-3D逐级设计的优势

- 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。

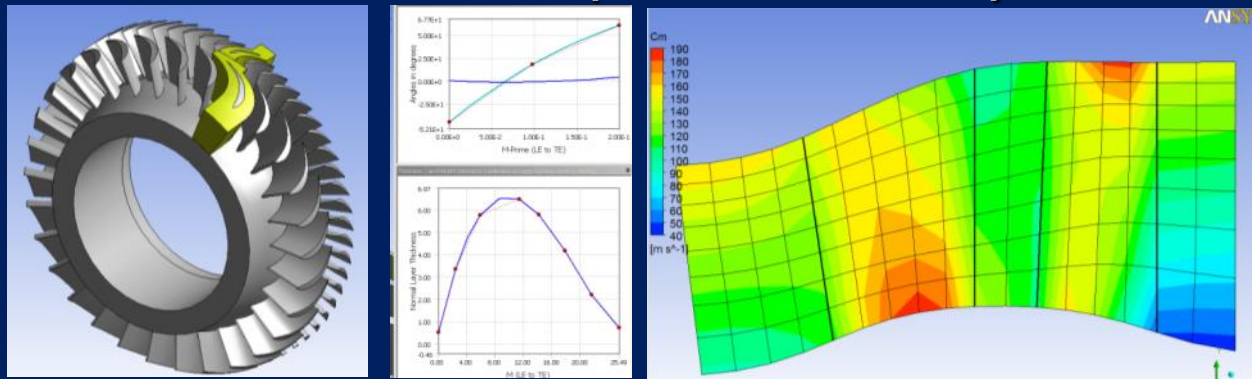
Simulation provides the power and efficient tools to enable designers to come up with optimal designs. But you still need to know what you are doing.

ANSYS提供功能强大的Workbench平台



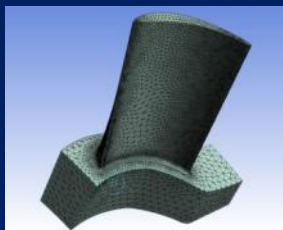
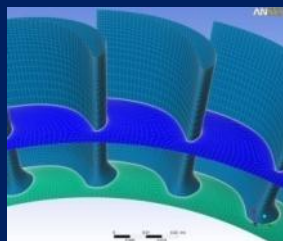
ANSYS Workbench

几何参数化(中弧线和 通流道)

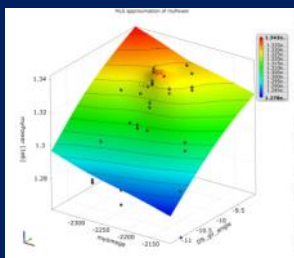
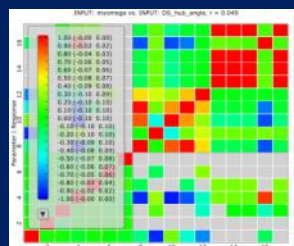


- Vista TF
- 快速分析

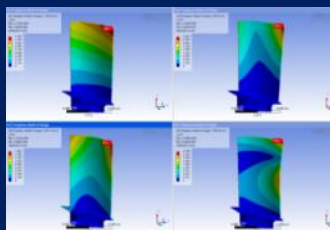
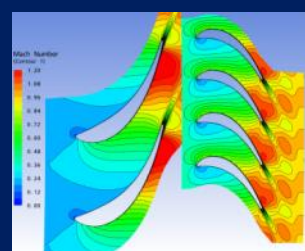
网格



鲁棒性设计

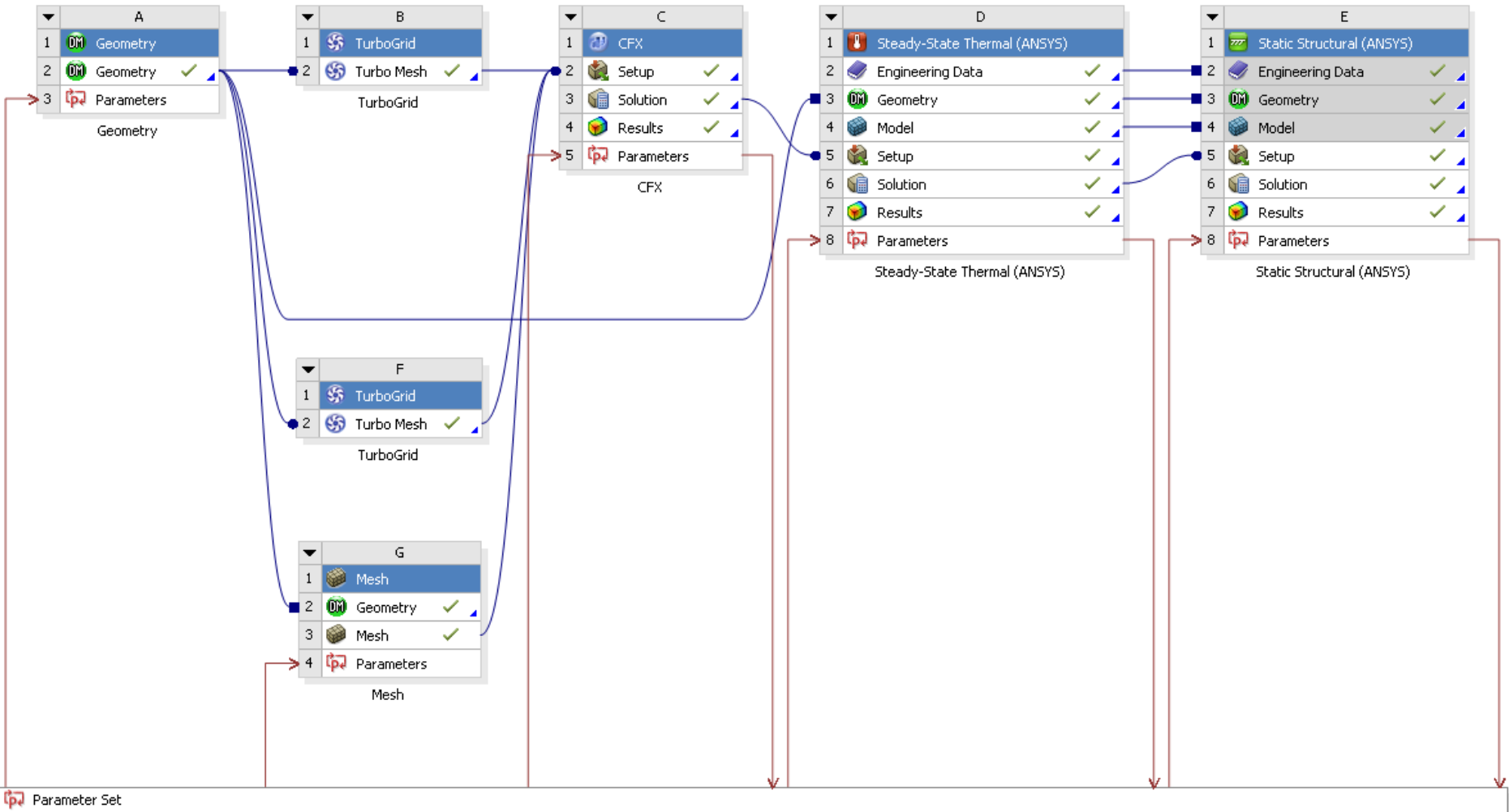


分析

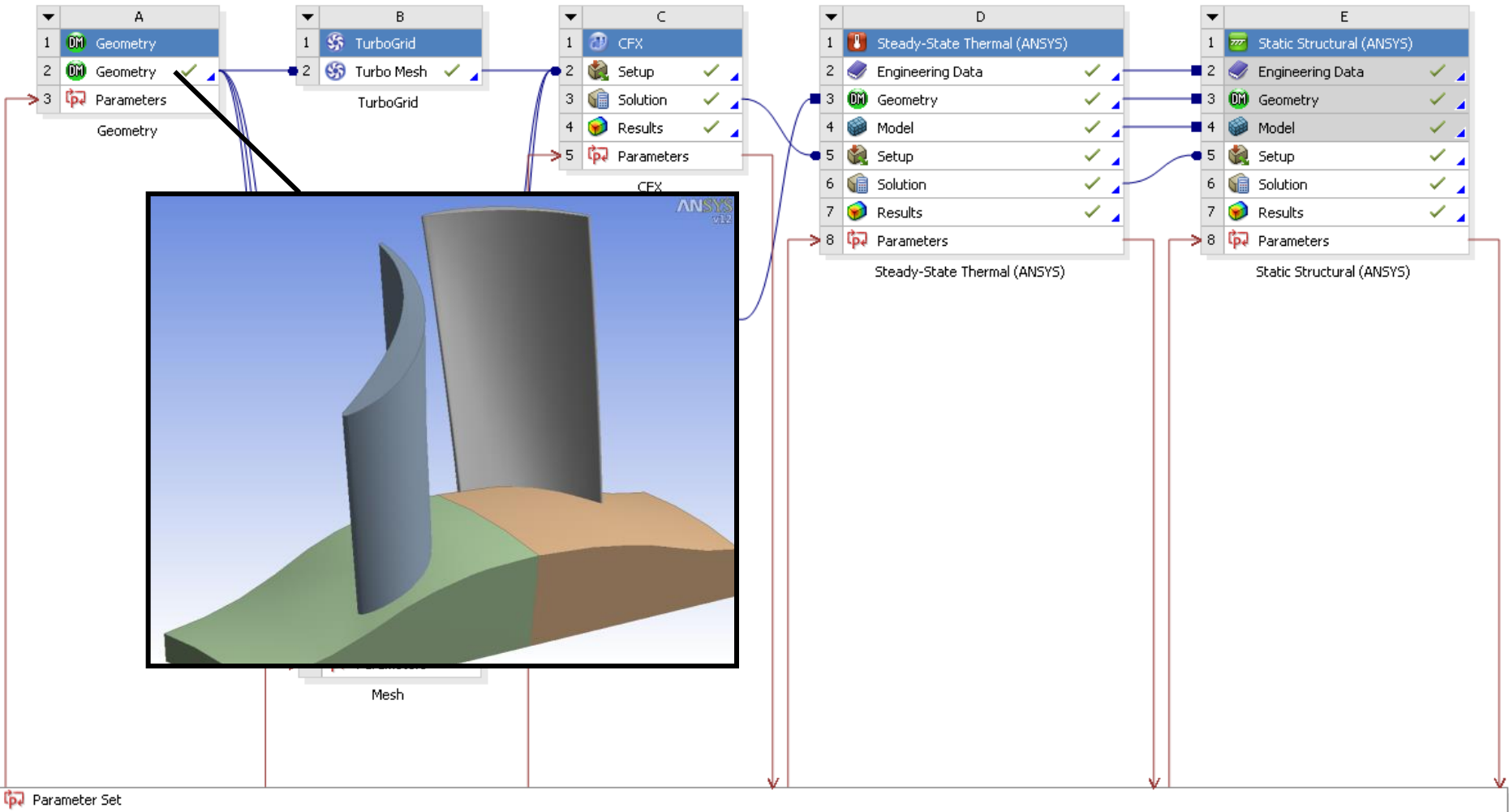


- 三维多物理场分析

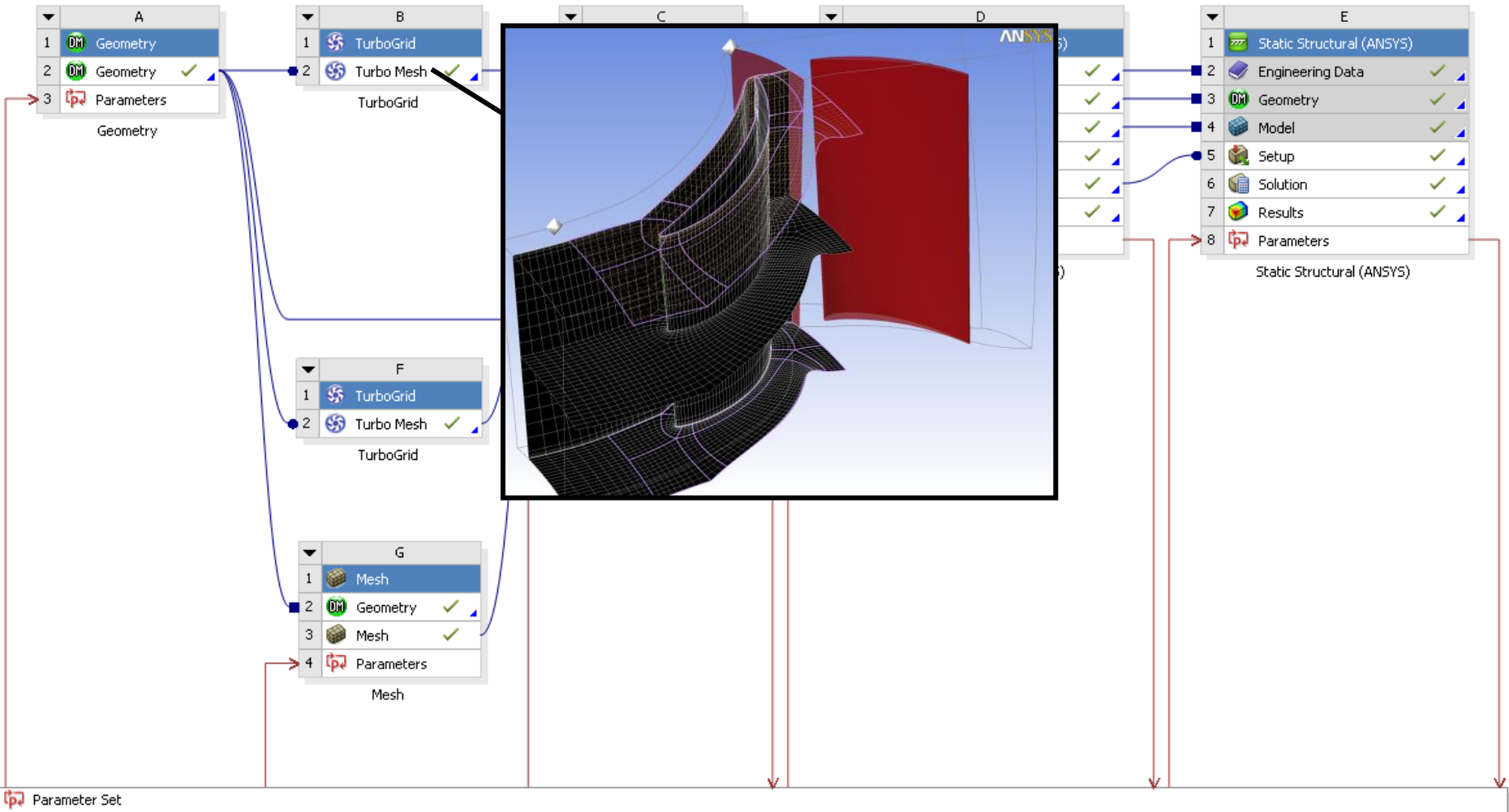
ANSYS Workbench



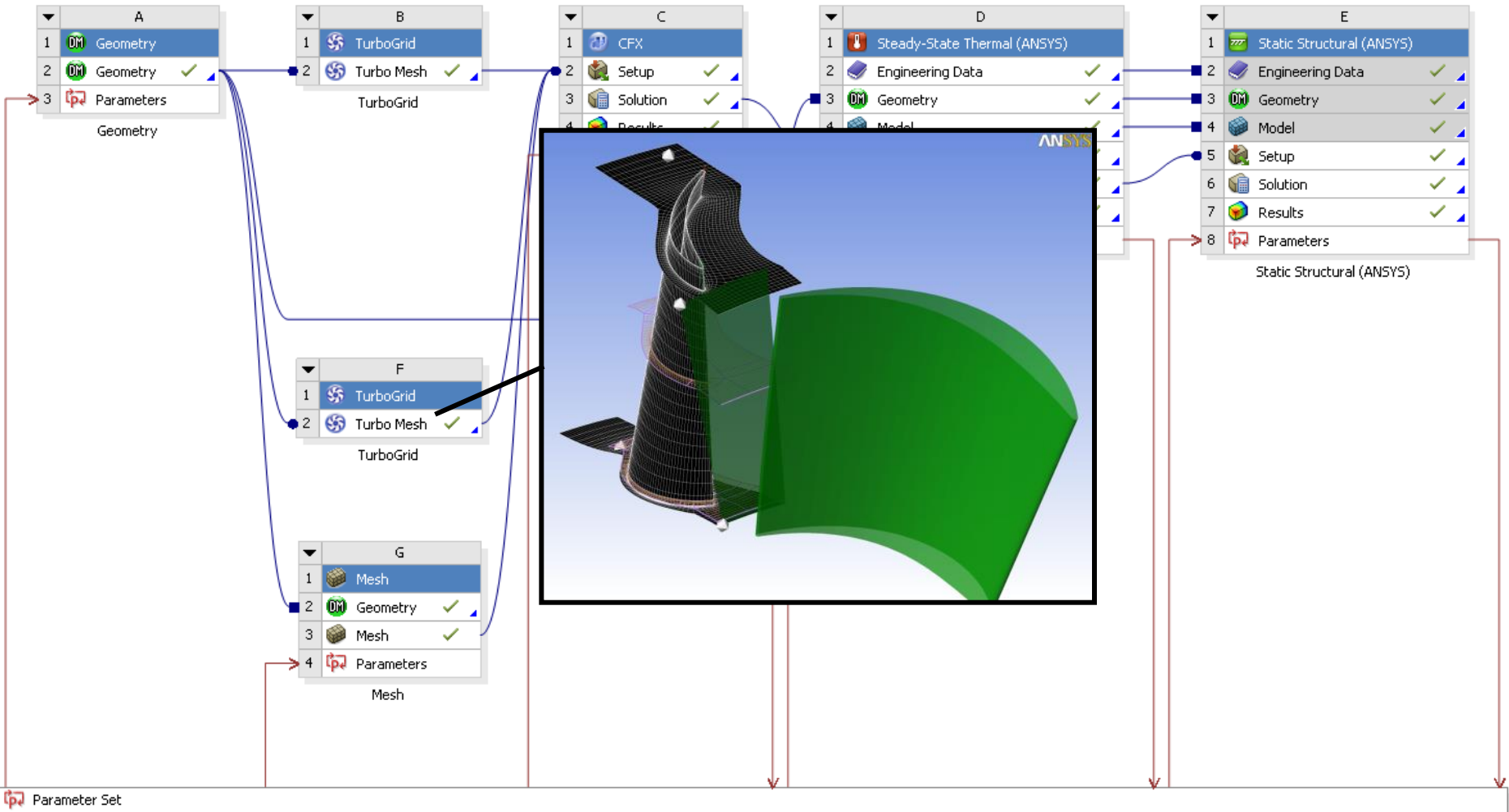
ANSYS Workbench



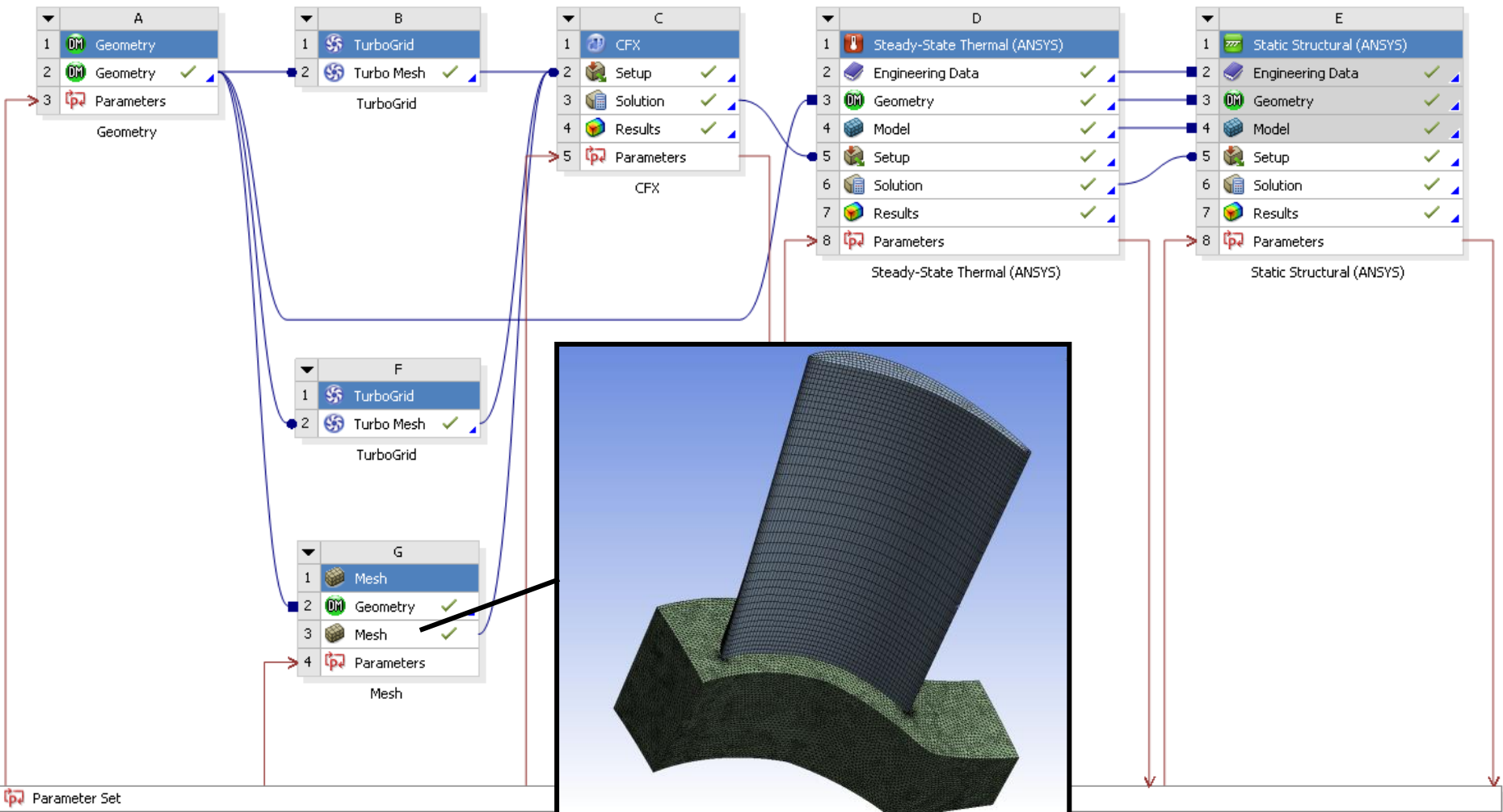
ANSYS Workbench



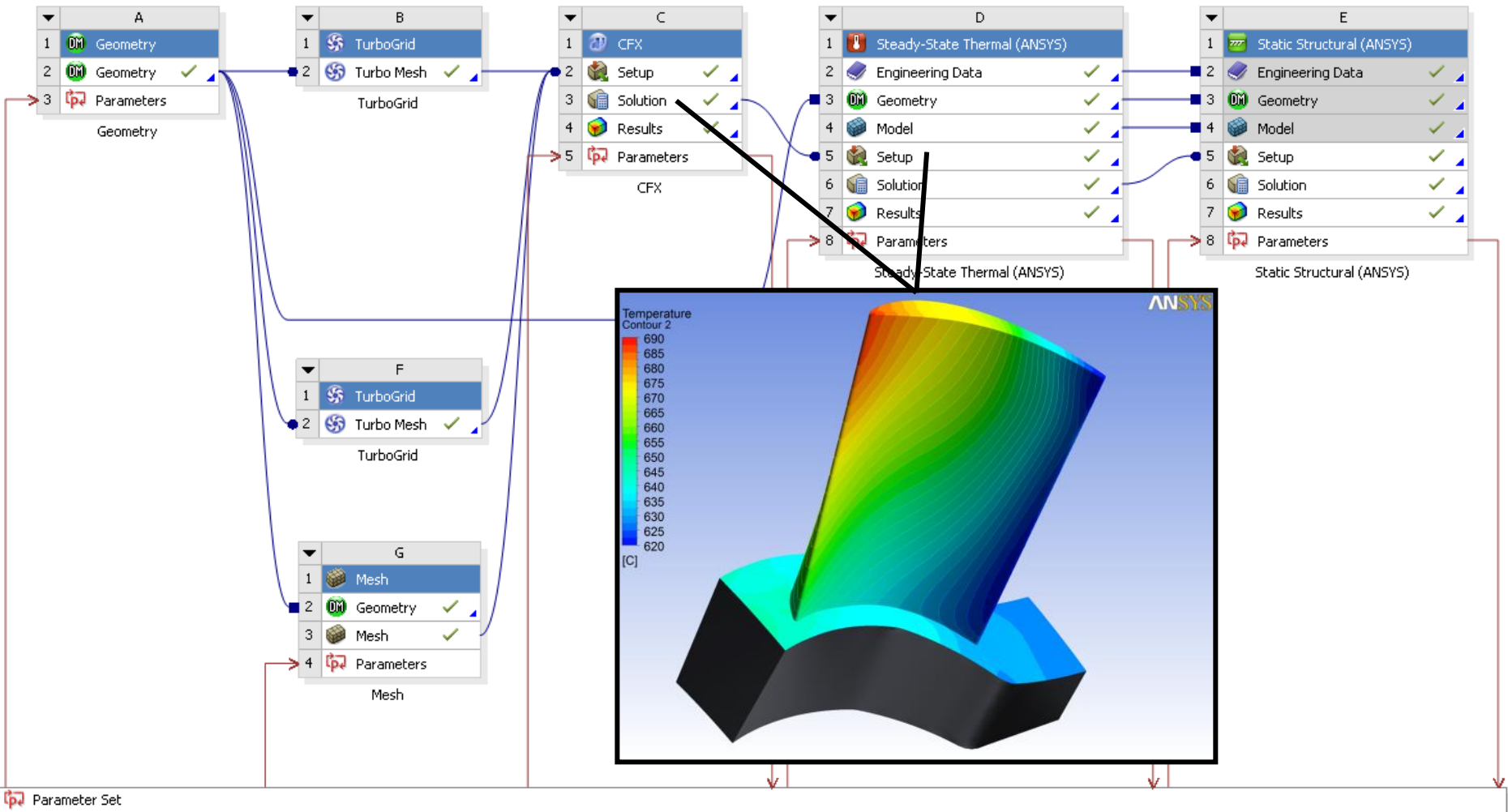
ANSYS Workbench



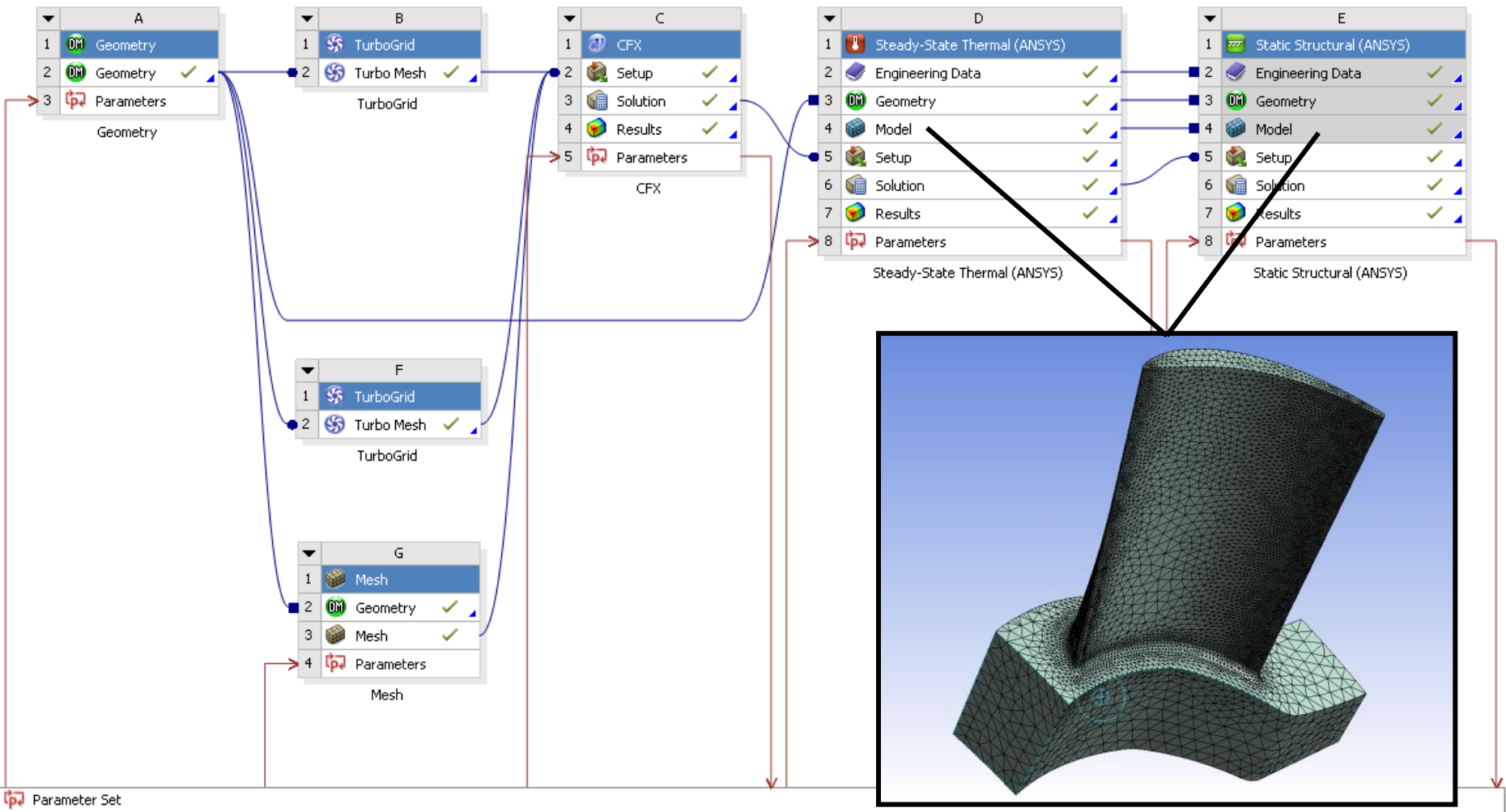
ANSYS Workbench



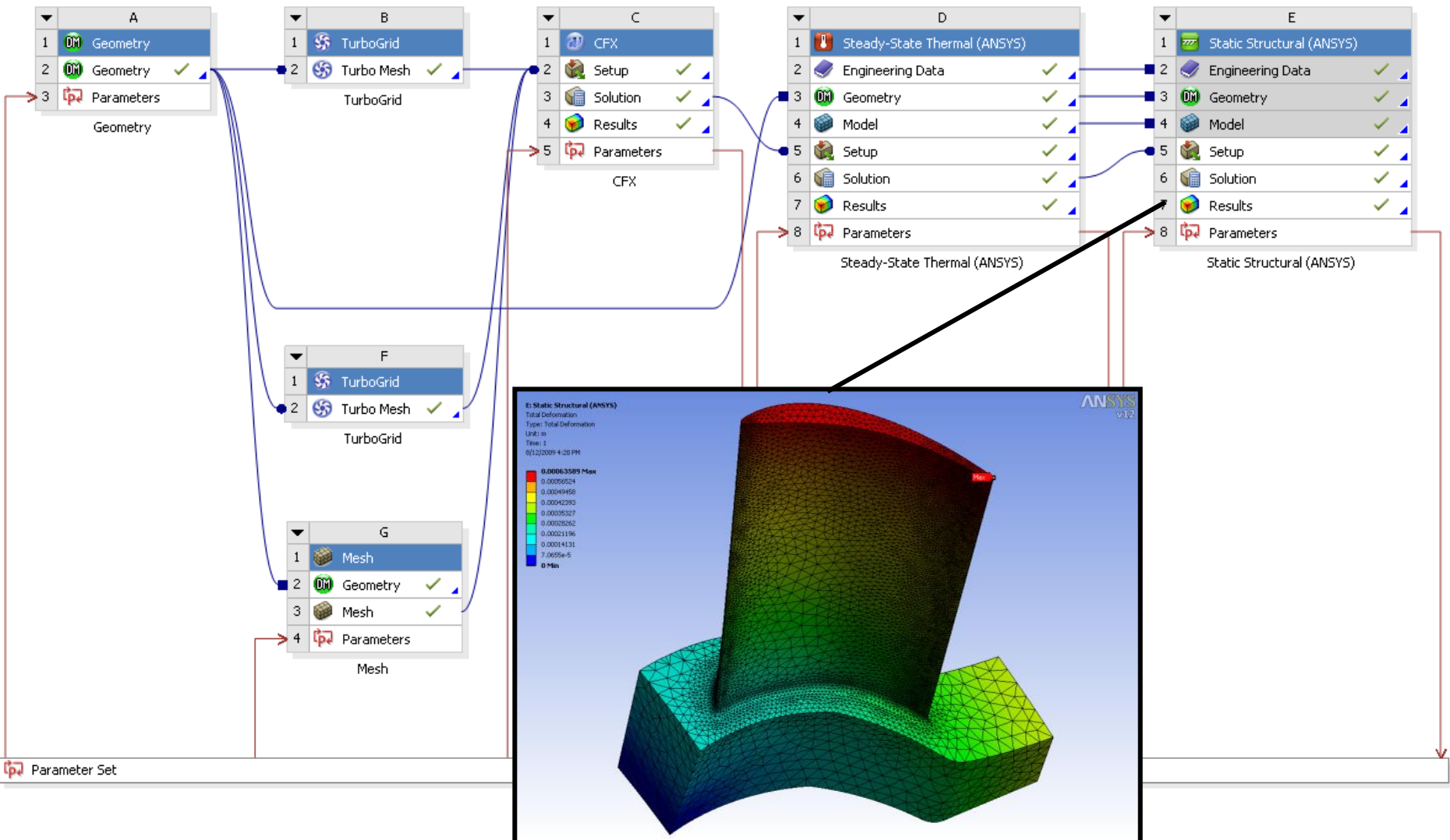
ANSYS Workbench



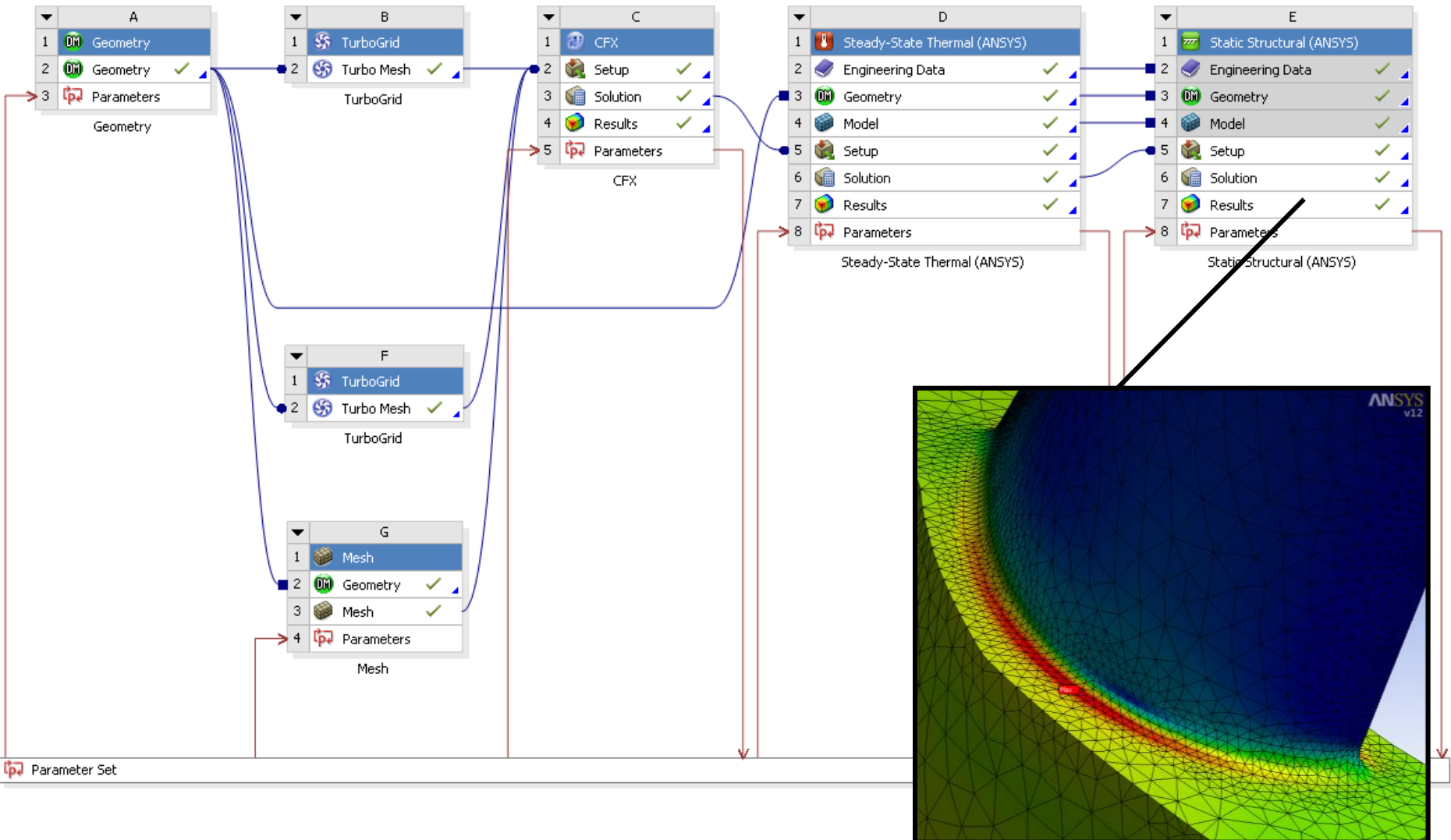
ANSYS Workbench



ANSYS Workbench



ANSYS Workbench

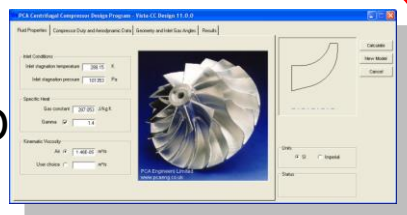


ANSYS BladeModeler 模块

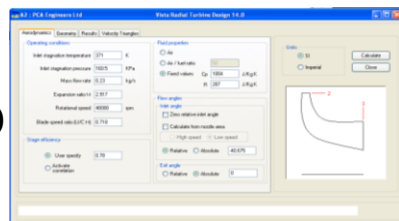
- **BladeModeler** 是快速、易用专门用于旋转机械的三维建模模块，包含以下组件：
 - **Meanline sizing tools** （中弧线设计工具）
 - ✓ **Vista AFD** (轴流风扇设计)
 - ✓ **Vista CPD** (离心泵设计)
 - ✓ **Vista CCD** (离心压缩机设计)
 - ✓ **Vista RTD** (径向透平机设计)
 - **BladeGen**
 - **DesignModeler** （带**BladeEditor** 插件）

ANSYS BladeModeler 模块

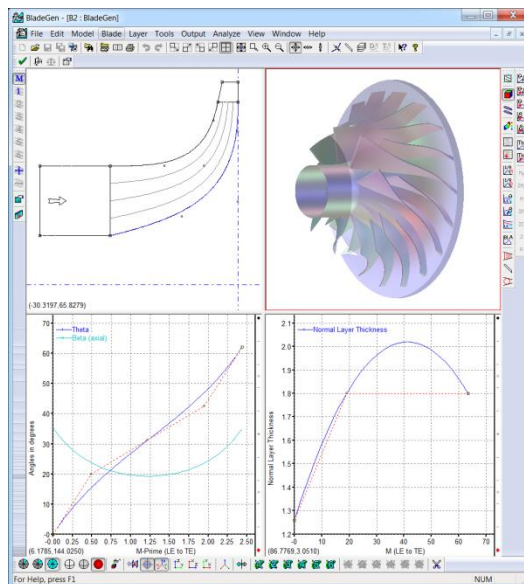
Vista CCD



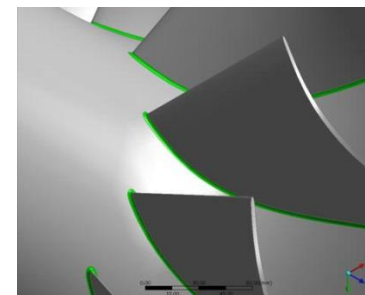
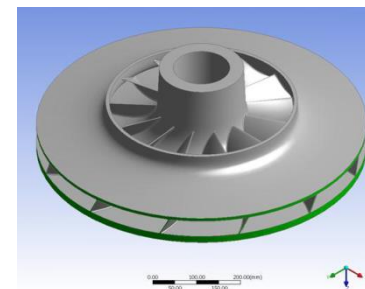
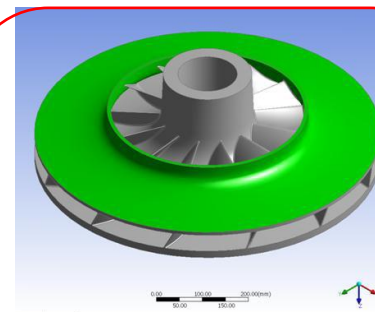
Vista RTD



Meanline sizing tools

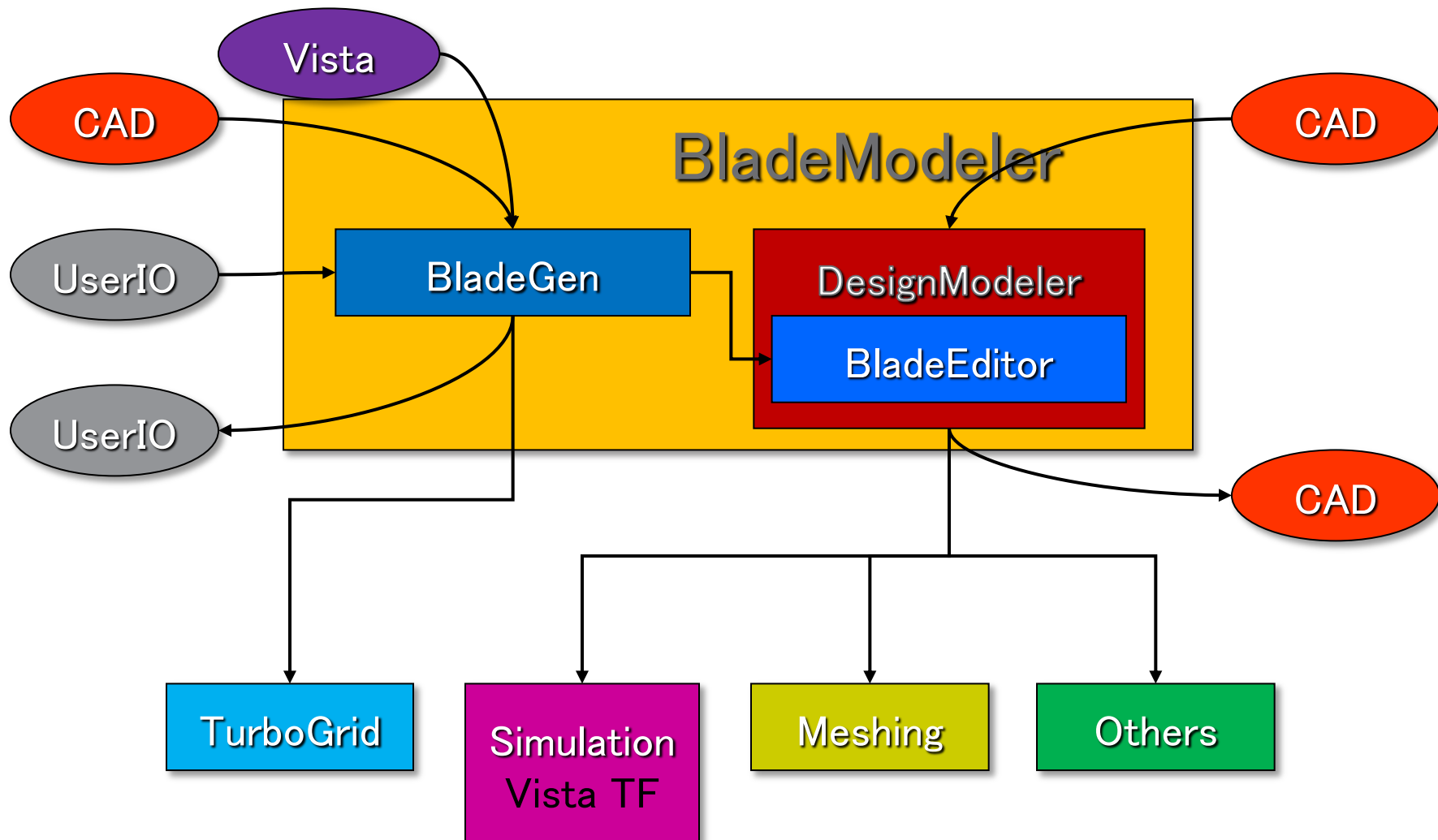


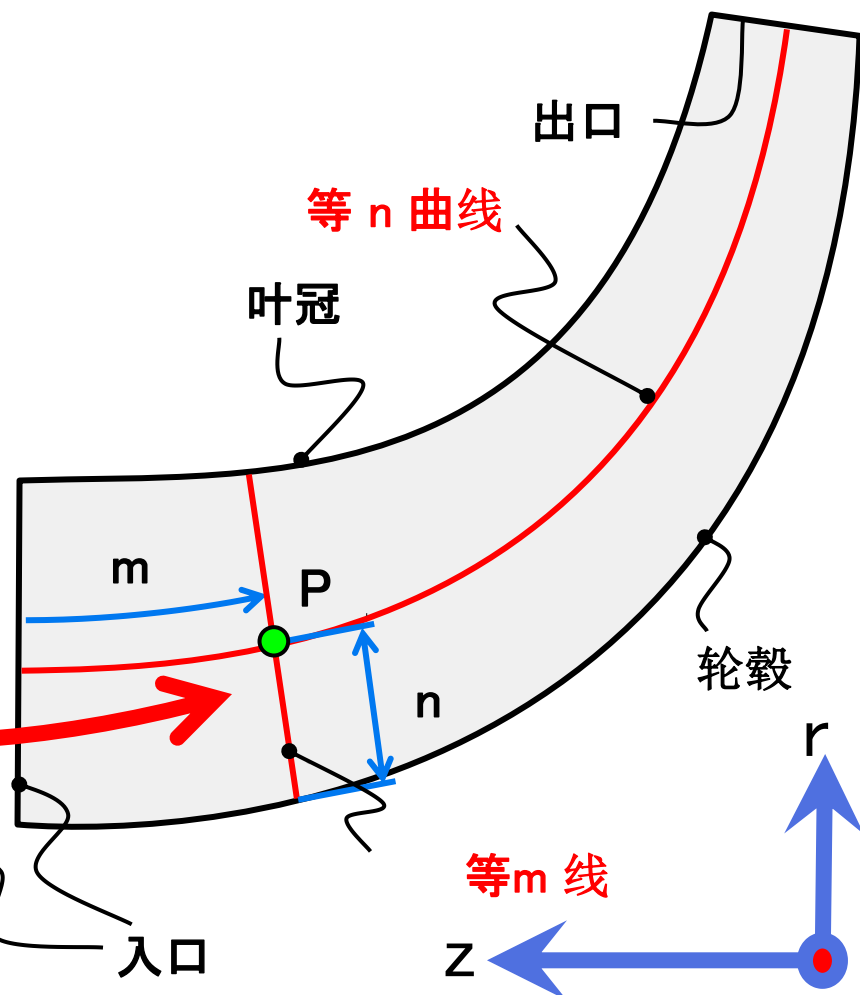
BladeGen



DesignModeler

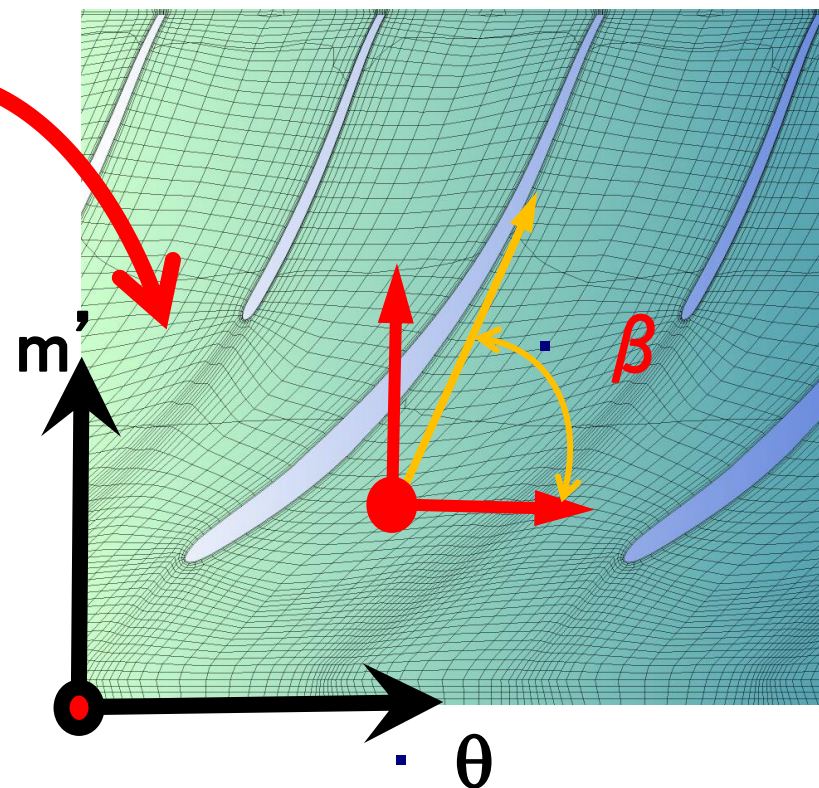
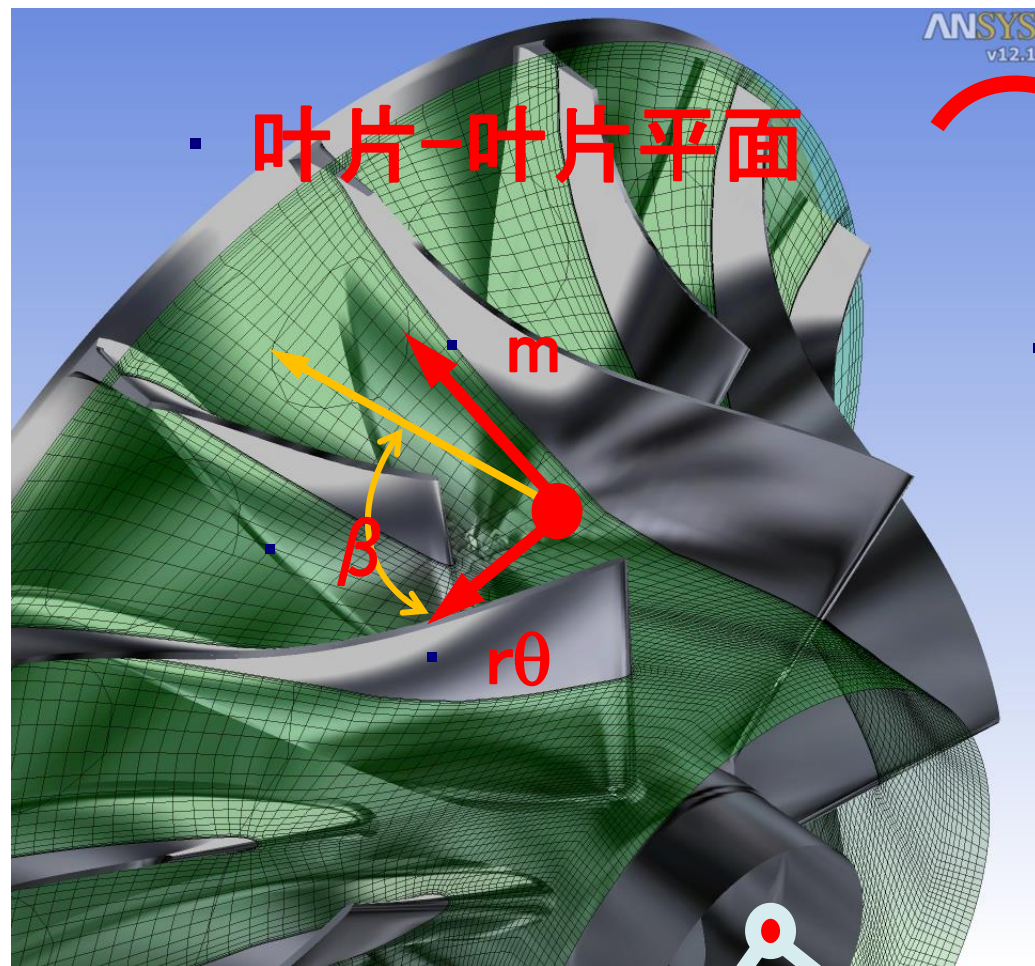
ANSYS BladeModeler 工作流程





m: 沿流向位置
n: 沿展长位置

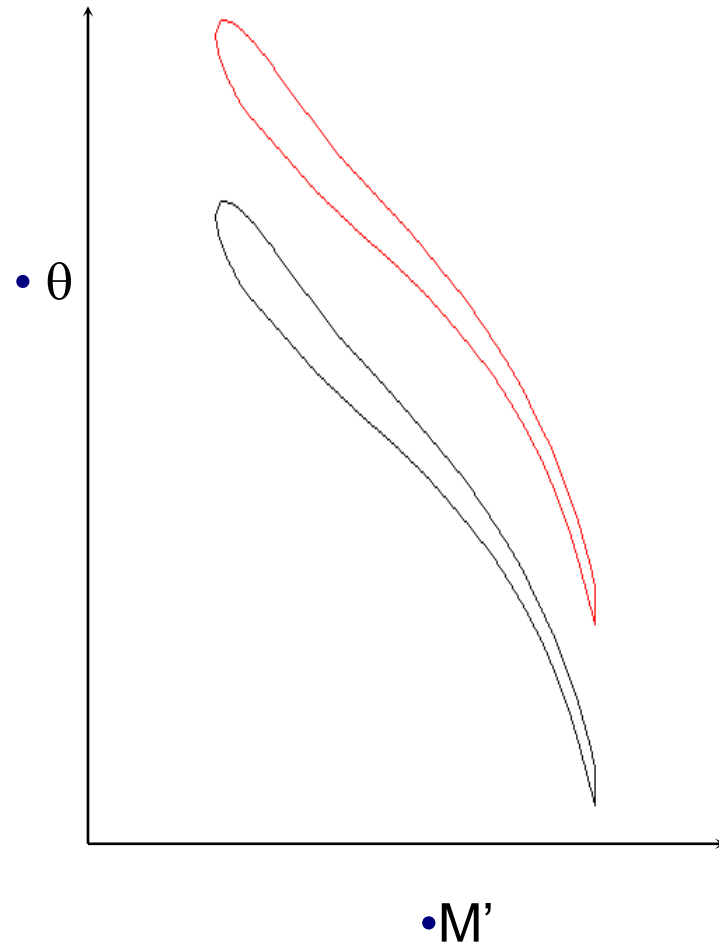
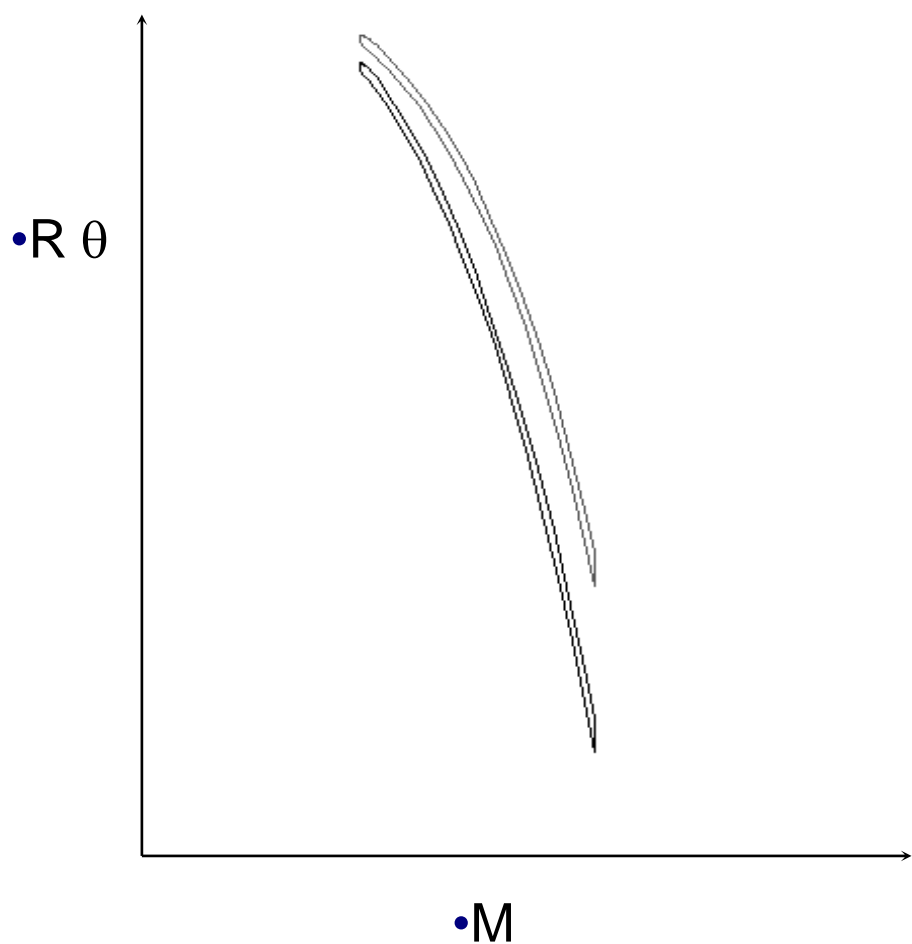
中弧线设计工具的相关坐标定义



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

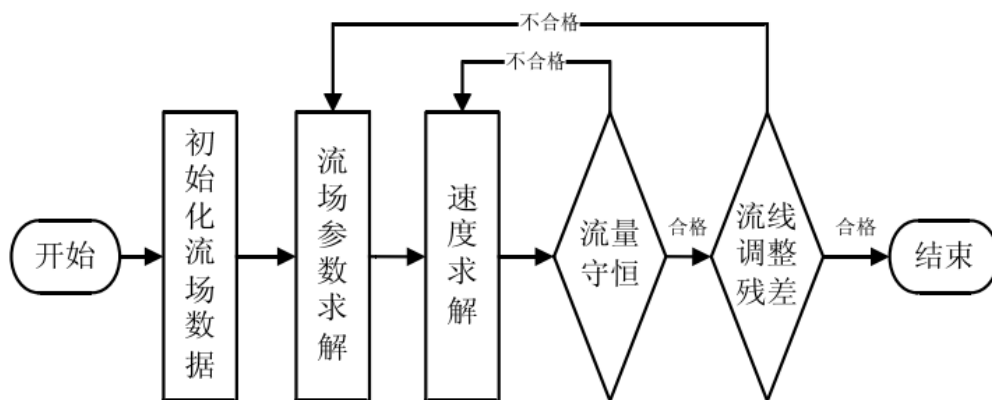
$$z \tan(\beta) = \frac{dm'}{d\theta}$$

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

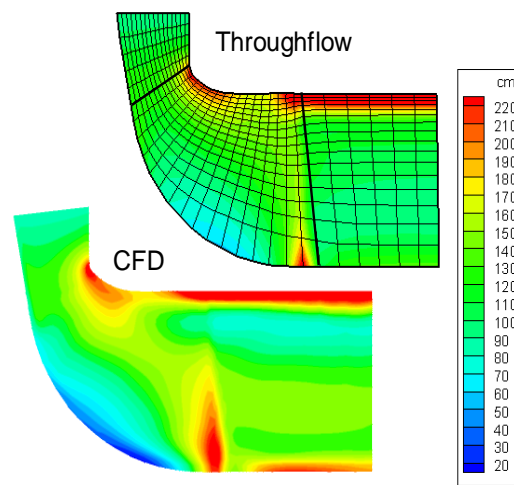
- 连接一维分析和三维CFD模拟之间的桥梁，设计者的重要工具
- 基于流线曲率法求解径向平衡方程，包含了经验修正来考虑摩擦损失、边界层移动和叶片上流动分离的影响。



- 考虑真实的气体属性的影响

优点:

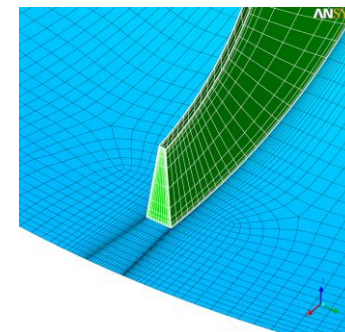
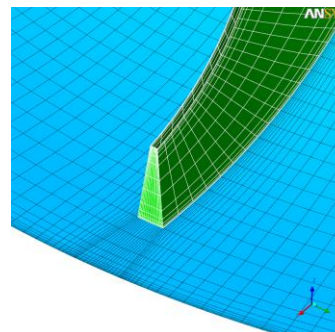
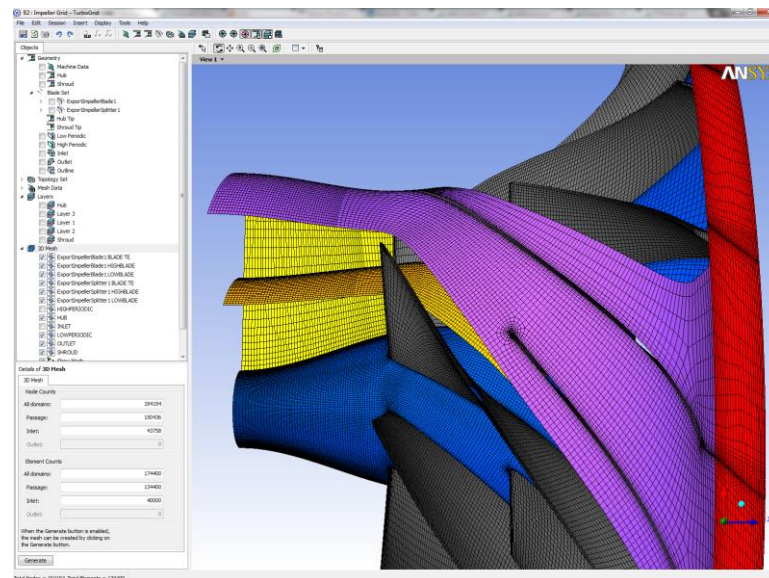
- 快速的修改几何和重新分析
 - 改进叶片和流道设计
 - 非常适合参数化和优化设计



三维网格的自动生成工具:ANSYS TurboGrid

■ 叶排网格的最佳选择

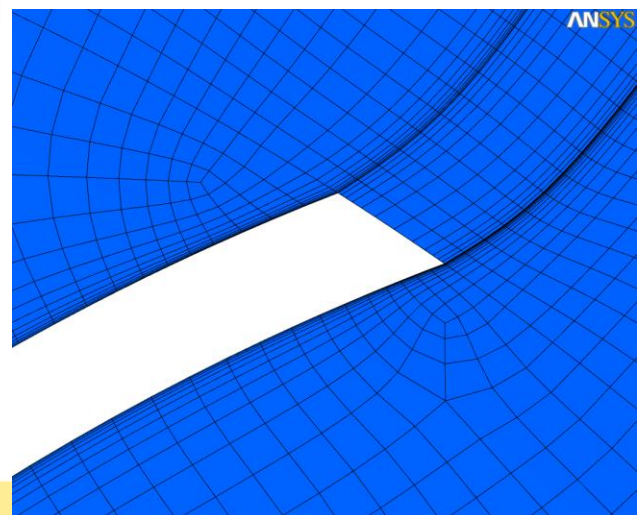
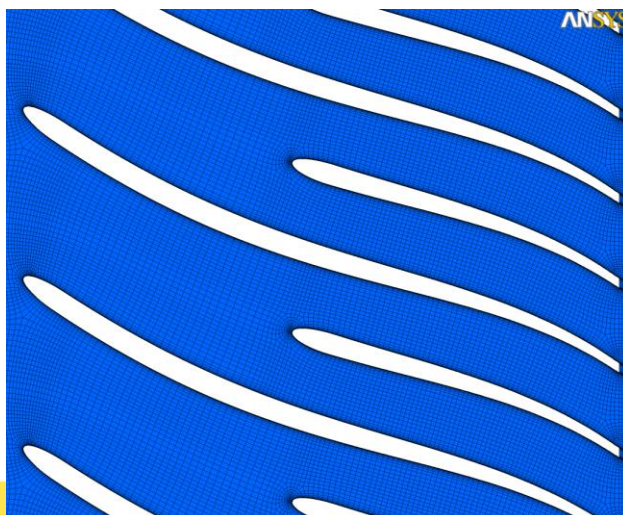
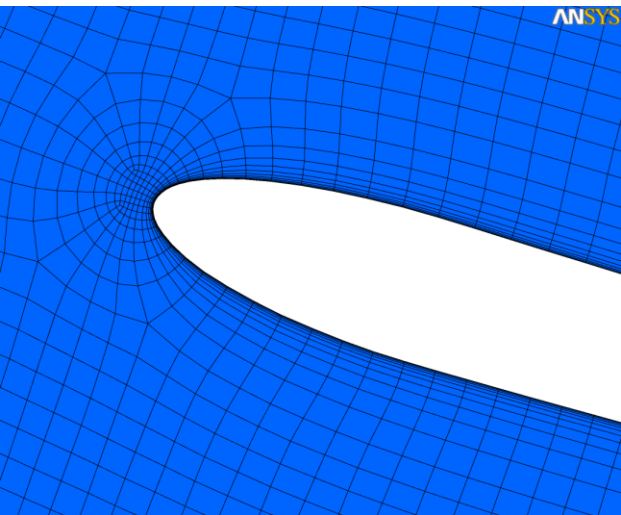
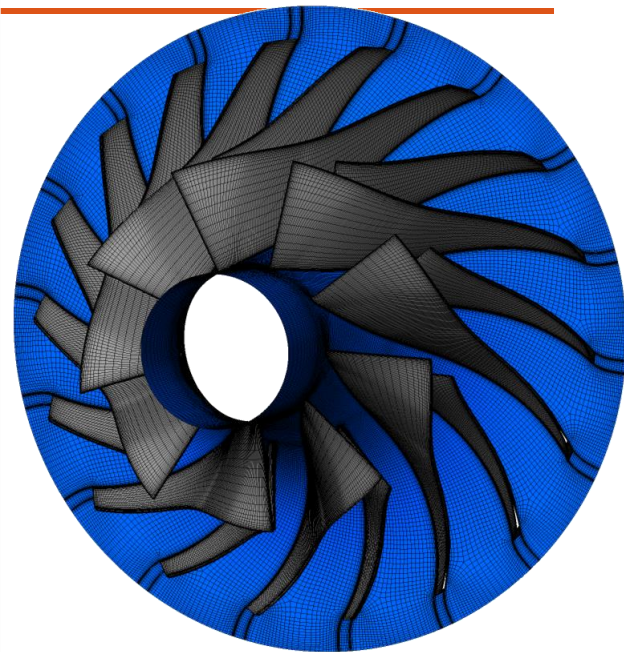
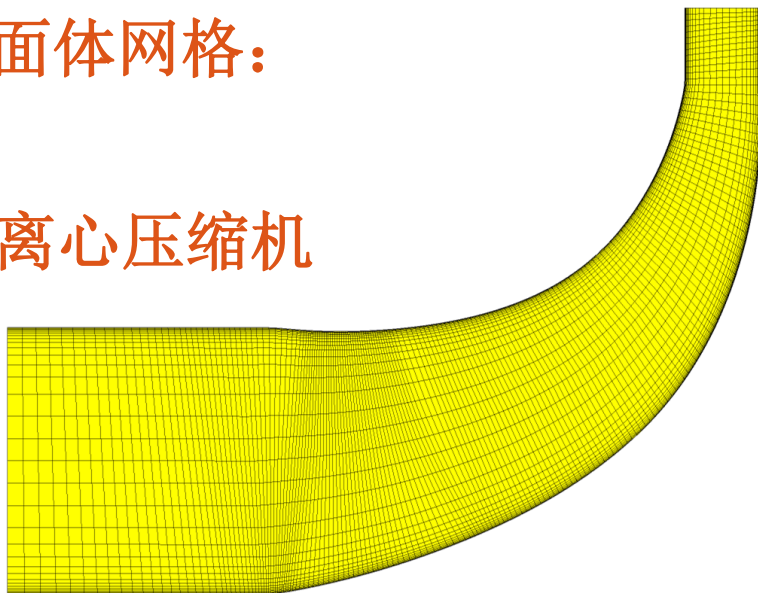
- 用户界面友好，自动化程度高
- 高质量的六面体网格
- 重复性好
 - ✓ 设计比较中将网格的影响降低到最小
- 扩展性好
 - ✓ 保持高质量的网格加密



三维网格的自动生成工具:ANSYS TurboGrid

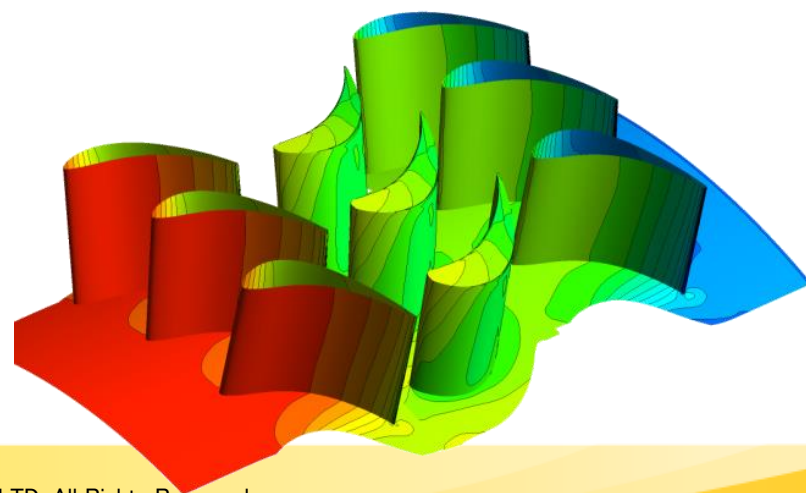
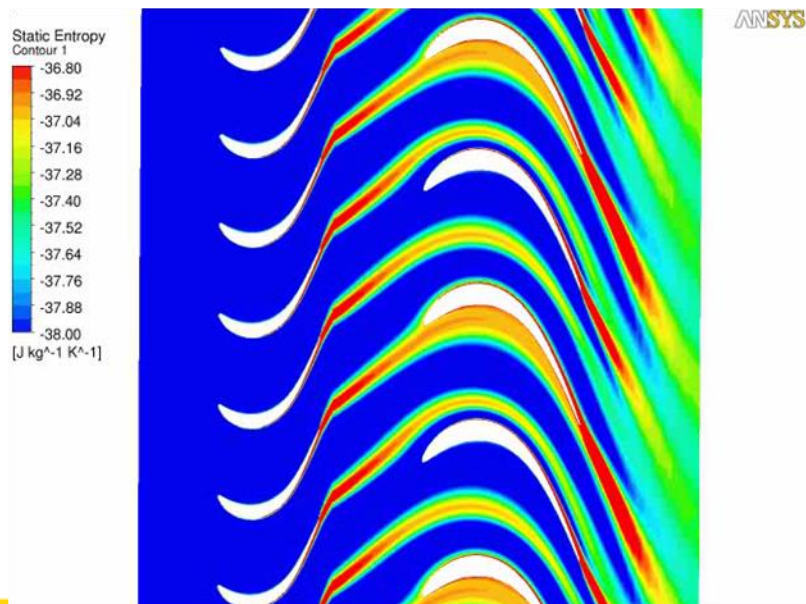
高质量的六面体网格:

- 离心压缩机

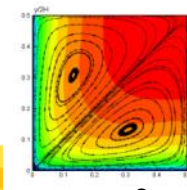
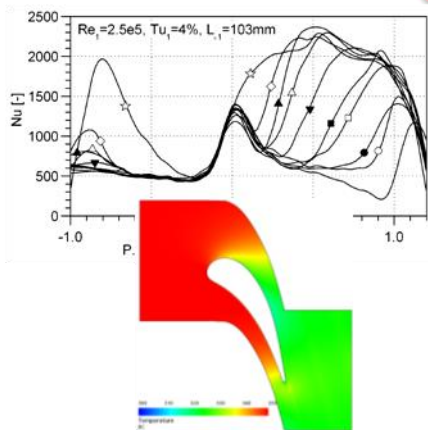
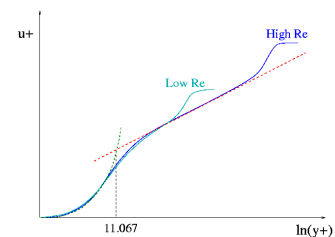
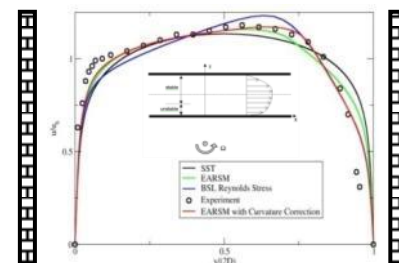
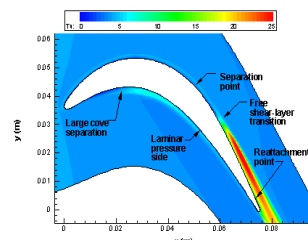
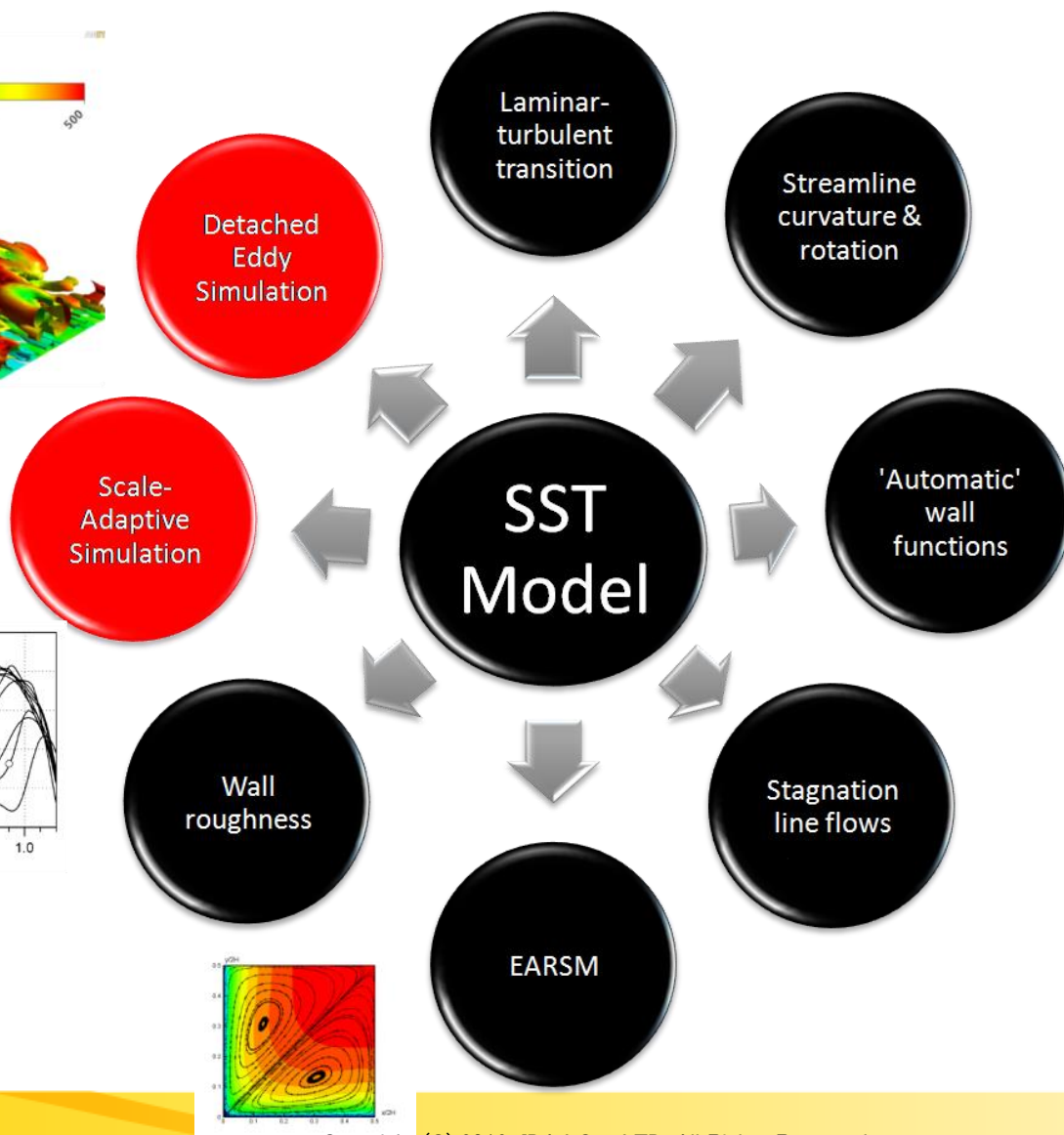
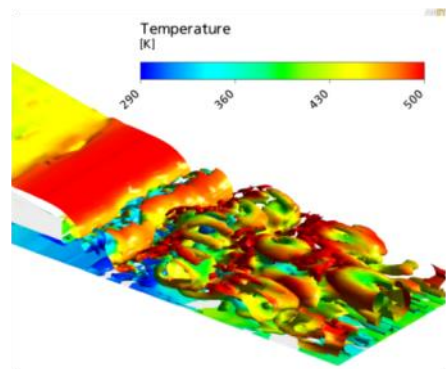


透平机械三维流场求解器 ANSYS CFD: CFX Fluent

- 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...

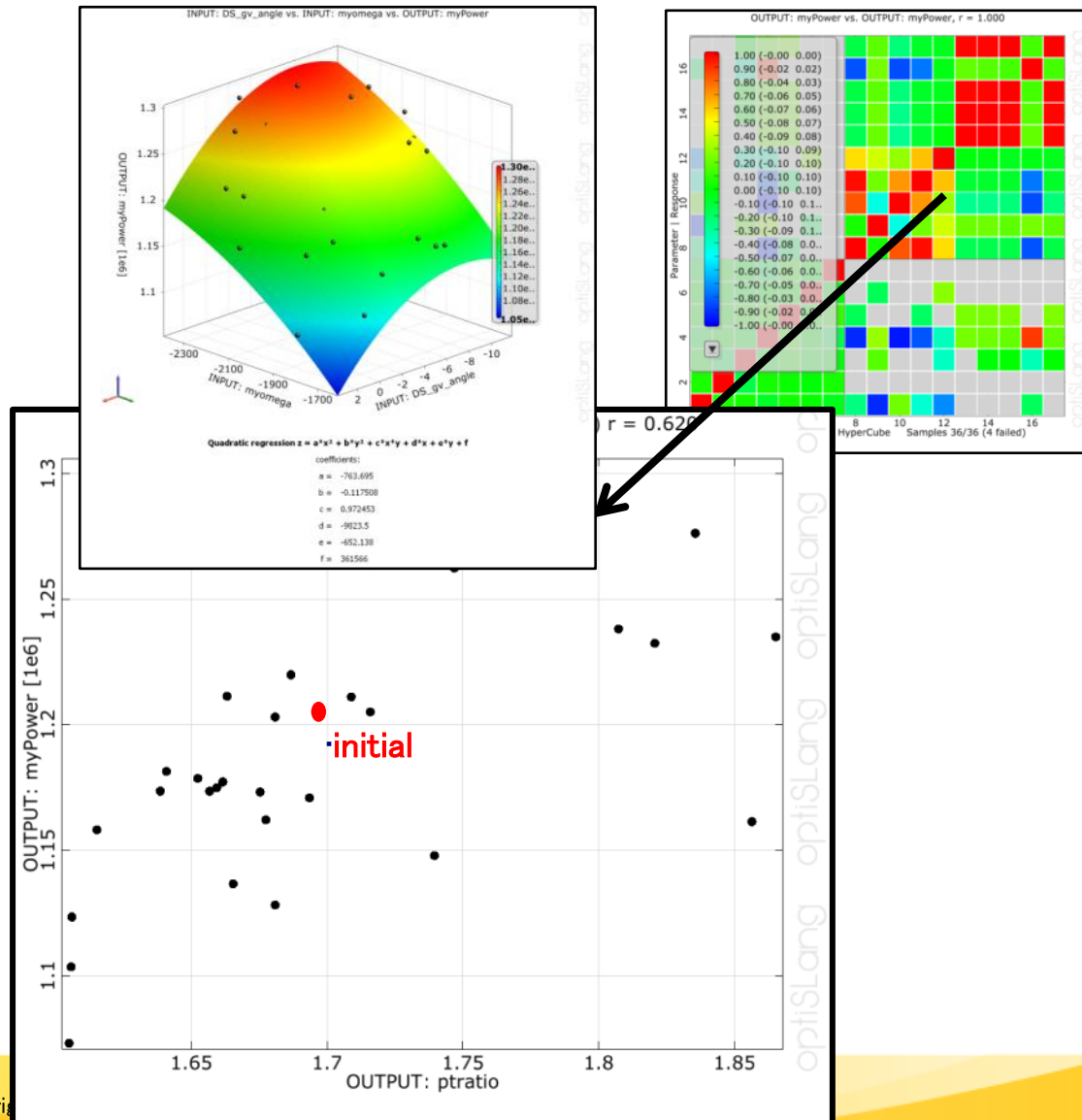
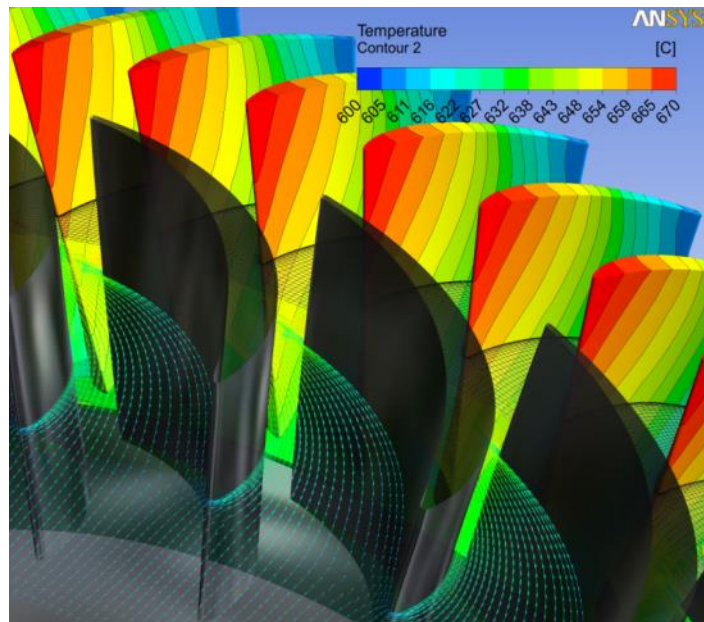


丰富的湍流模型



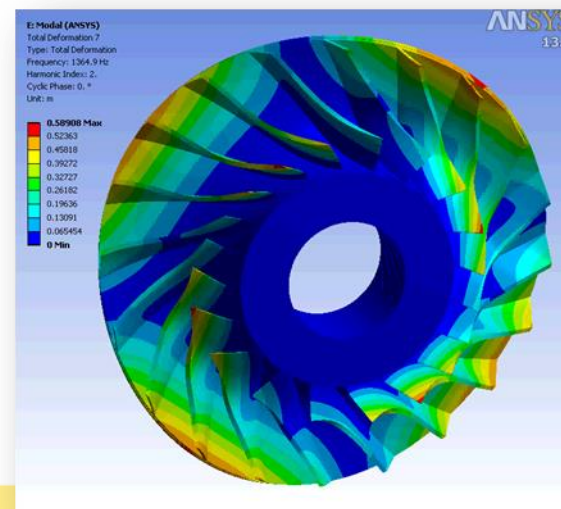
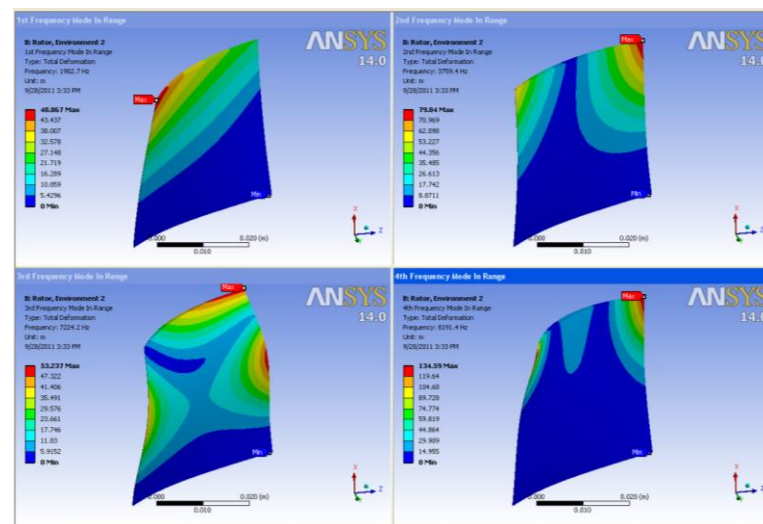
优化设计工具： ANSYS Design Exploration

- 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 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- ω 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 $0.1/\Omega$ 与 $1/\Omega$ 之间
 Ω 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

Vista B2 : PCA Engineers Ltd Vista Centrifugal Compressor Design 14.5

Duty and Aerodynamic Data | Gas properties | Geometry | Results

Duty

Overall pressure ratio: 2.15

Mass flow: 0.12 kg/s

Rotational speed: 155733 rpm

Inlet stagnation conditions

Temperature: 288.15 K

Pressure: 101353 Pa

Inlet gas angle

RMS angle: 0 deg

Radial distribution: constant angle

Vw ratio: 1

Incidence at shroud

☒ User specify: -8.1 deg

☐ Calculate from choke margin: 0.9

Stage efficiency

☒ Correlation

Efficiency correlations: Casey-Robinson

☒ Reynolds number correction

☒ Tip clearance and shroud correction

☐ User specify

User efficiency

☐ Polytropic: 0.83

☒ Isentropic: 0.792

Impeller isentropic efficiency

☒ Link to stage

☐ User specify: 0.862

Power input factor

☒ Correlation

☐ User specify: 1.04

Other aerodynamic data

Merid. velocity gradient: 1.08

Relative velocity ratio: 0.6

Units

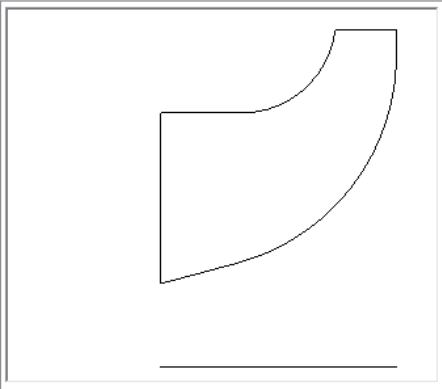
☒ SI

☐ Imperial

Calculate

Close

Impeller Sketch | **Efficiency Plot**

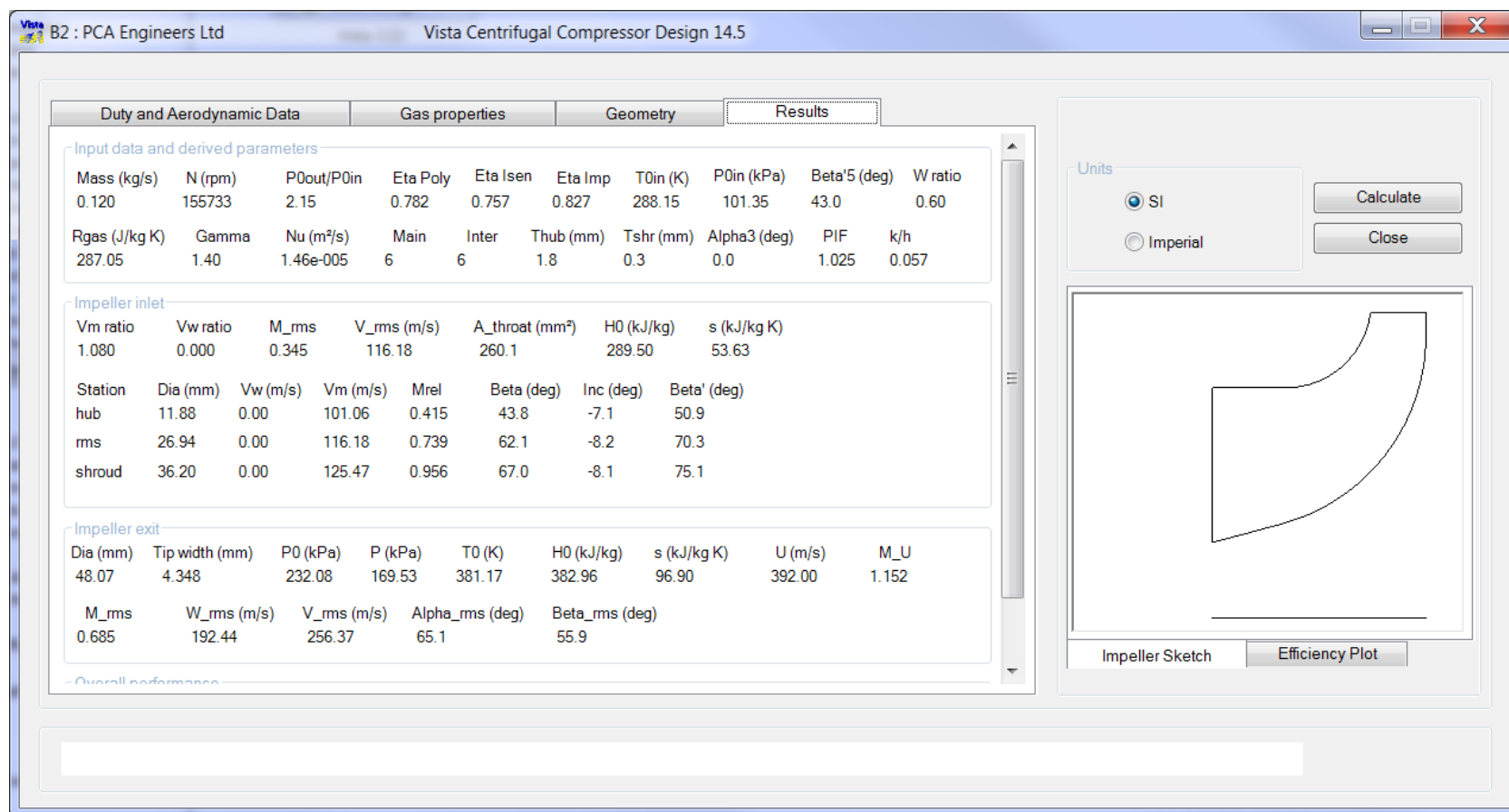


涡轮增压器分析典例

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

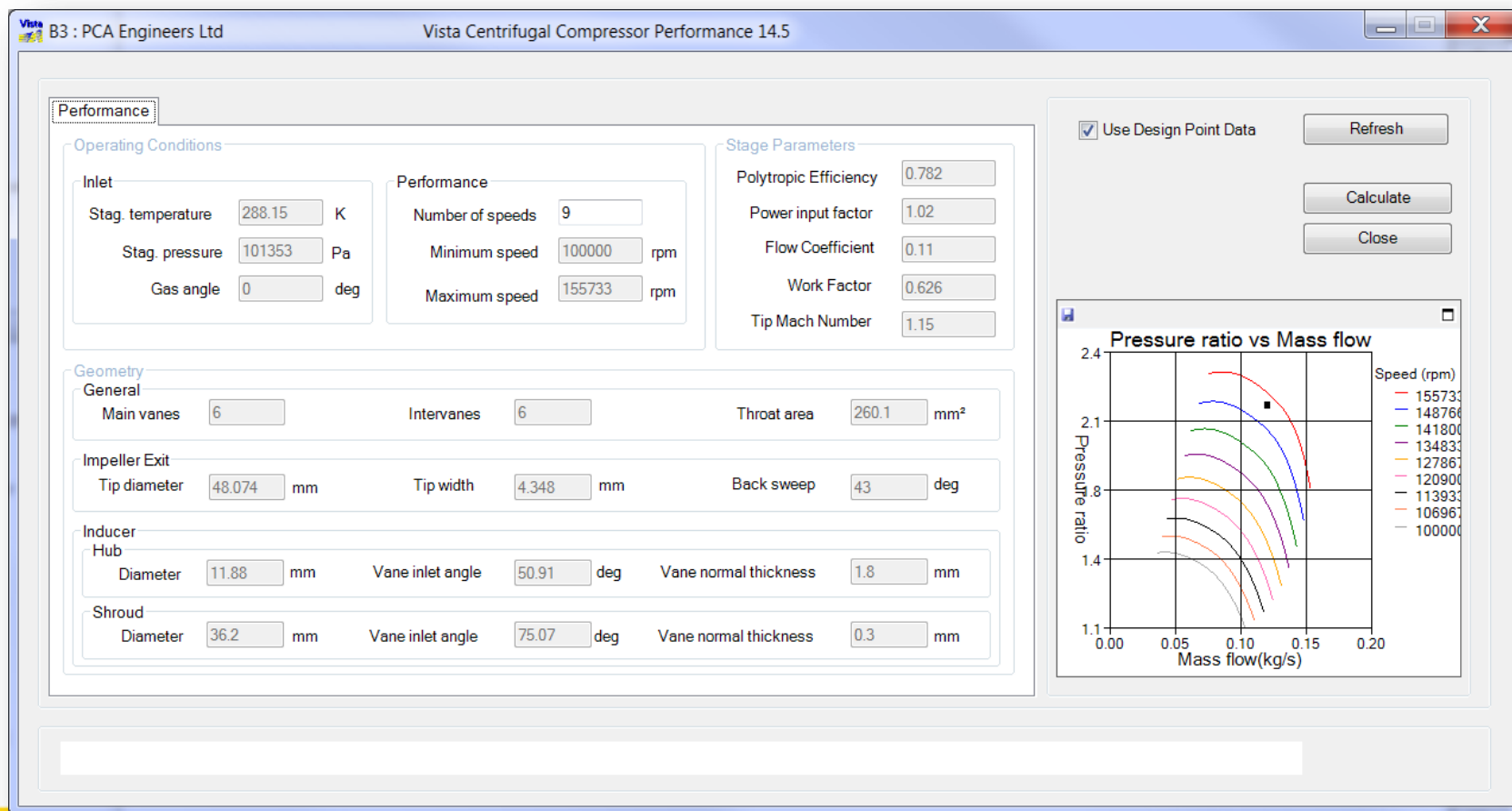


涡轮增压器分析典例

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

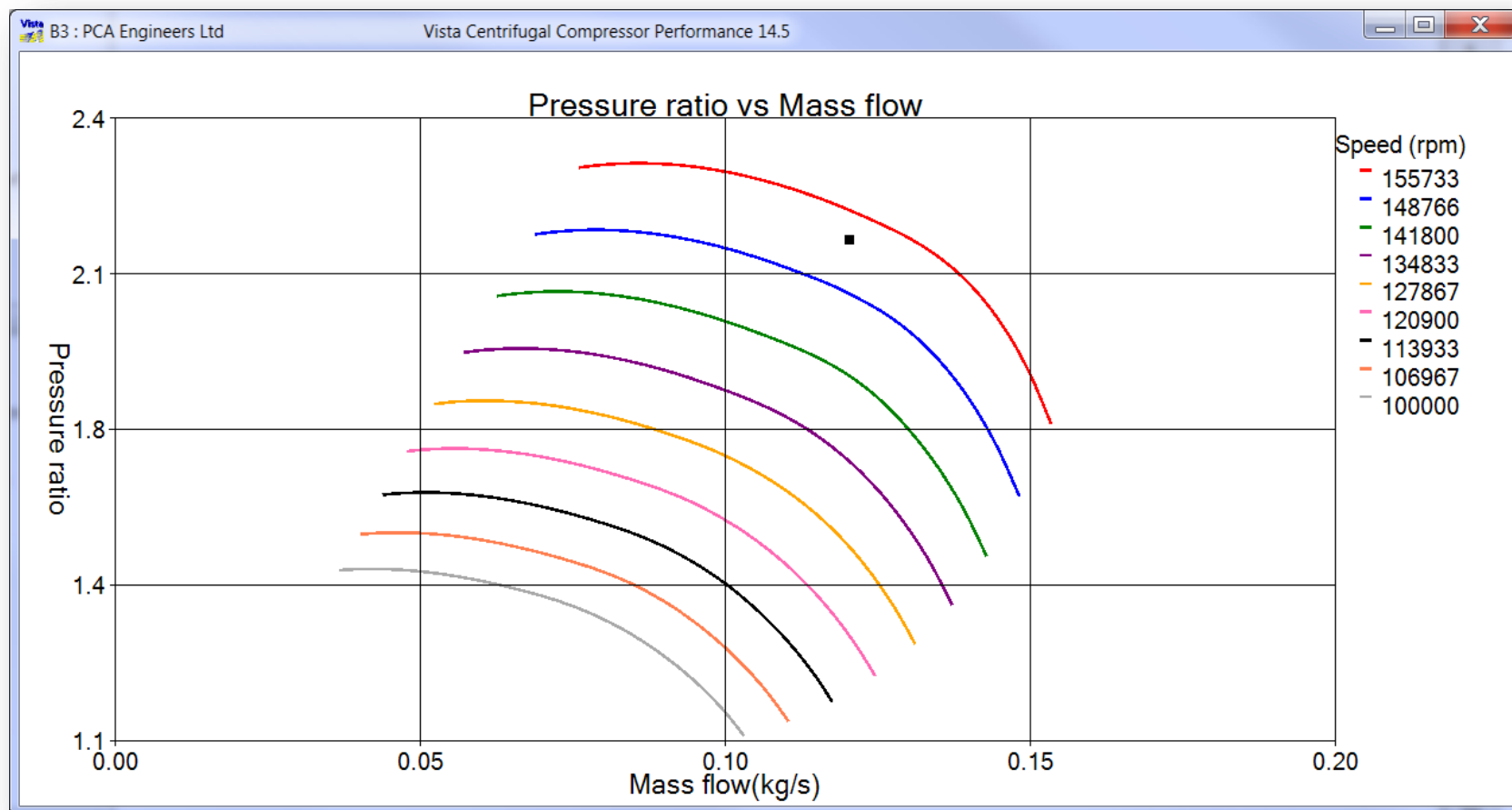


涡轮增压器分析典例

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

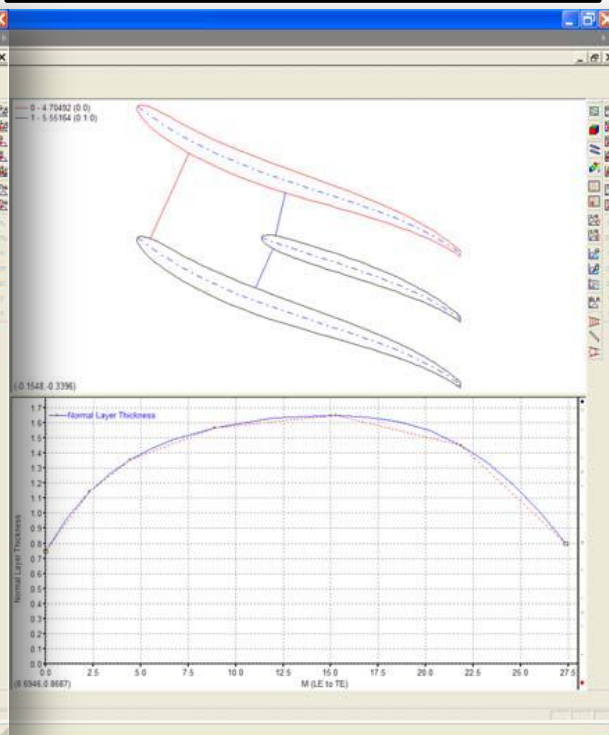
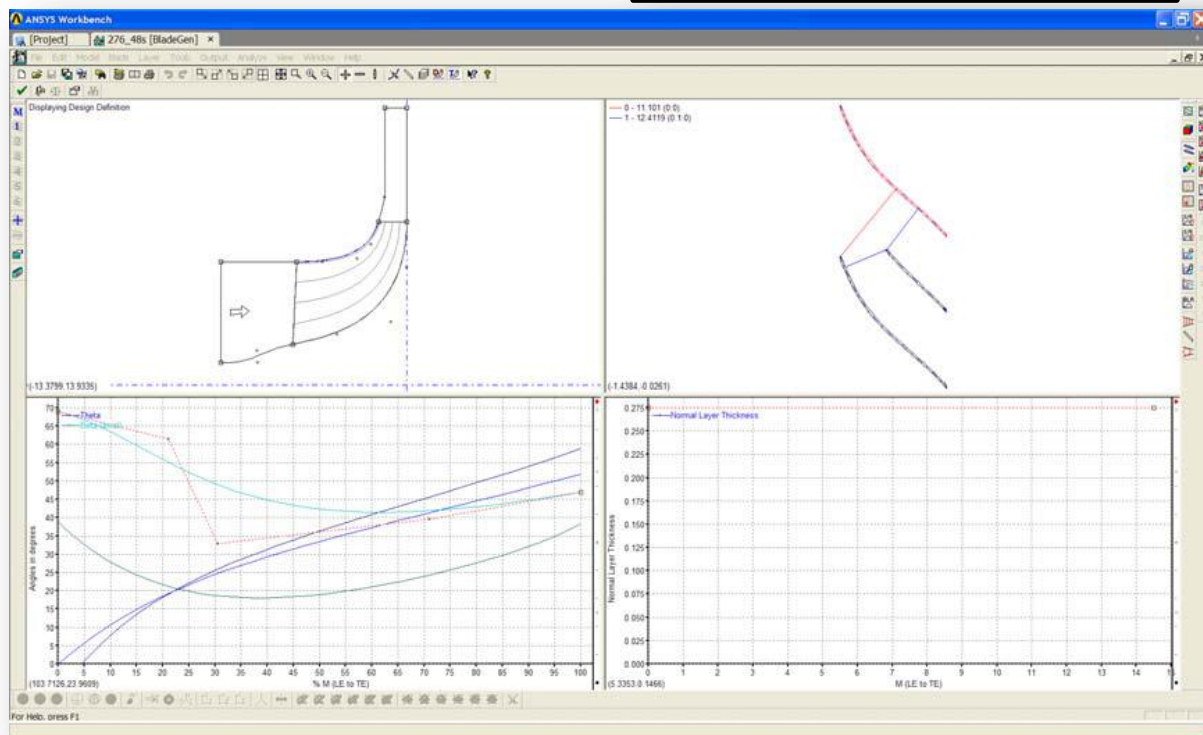
几何建模:

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

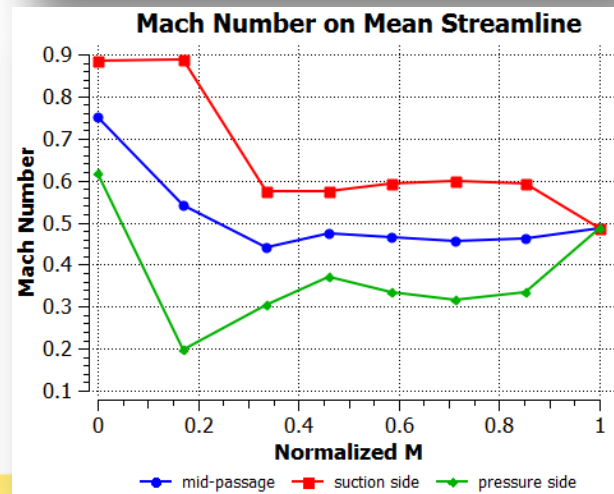
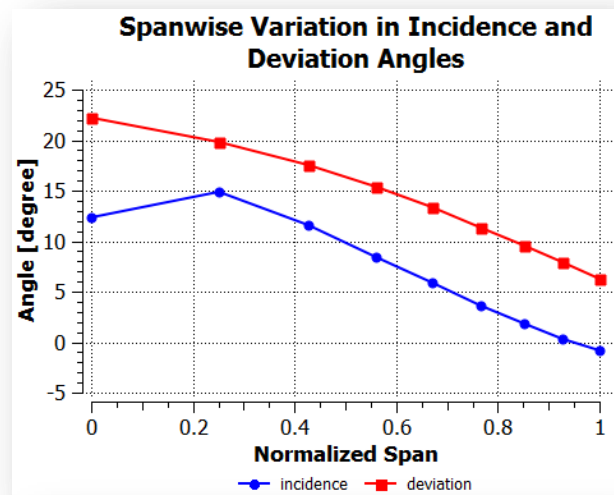
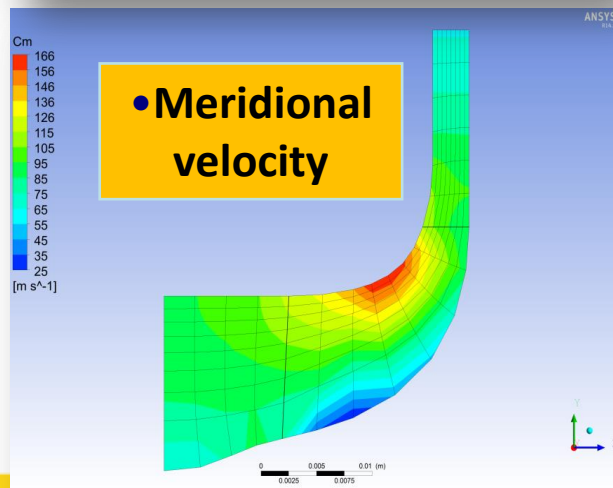
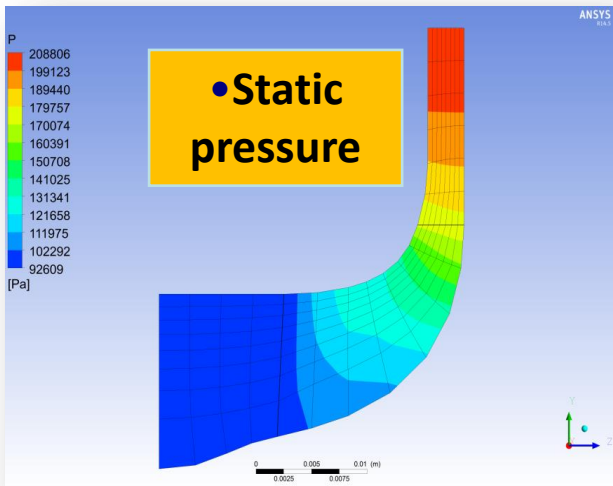
压缩机轮毂剖面



涡轮增压器分析典例

几何建模:

Vista TF: 定性结果输出

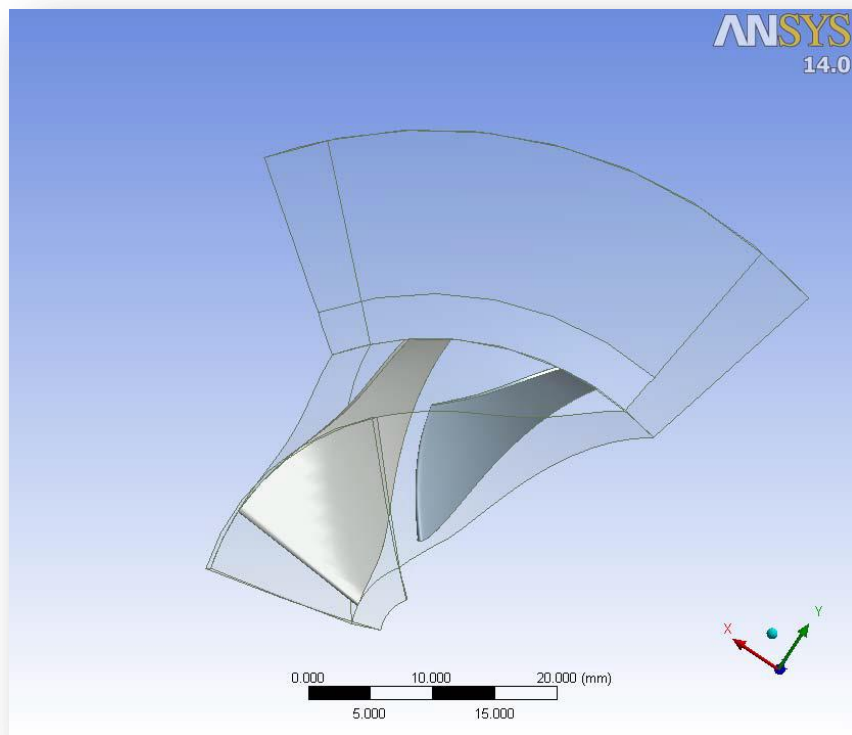


涡轮增压器分析典例

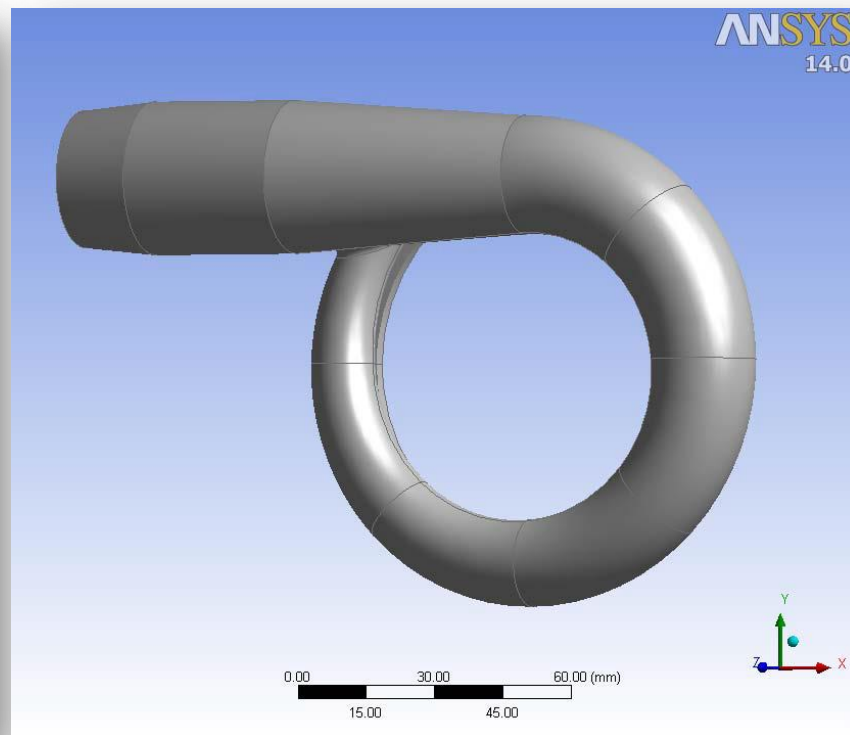
几何建模：

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

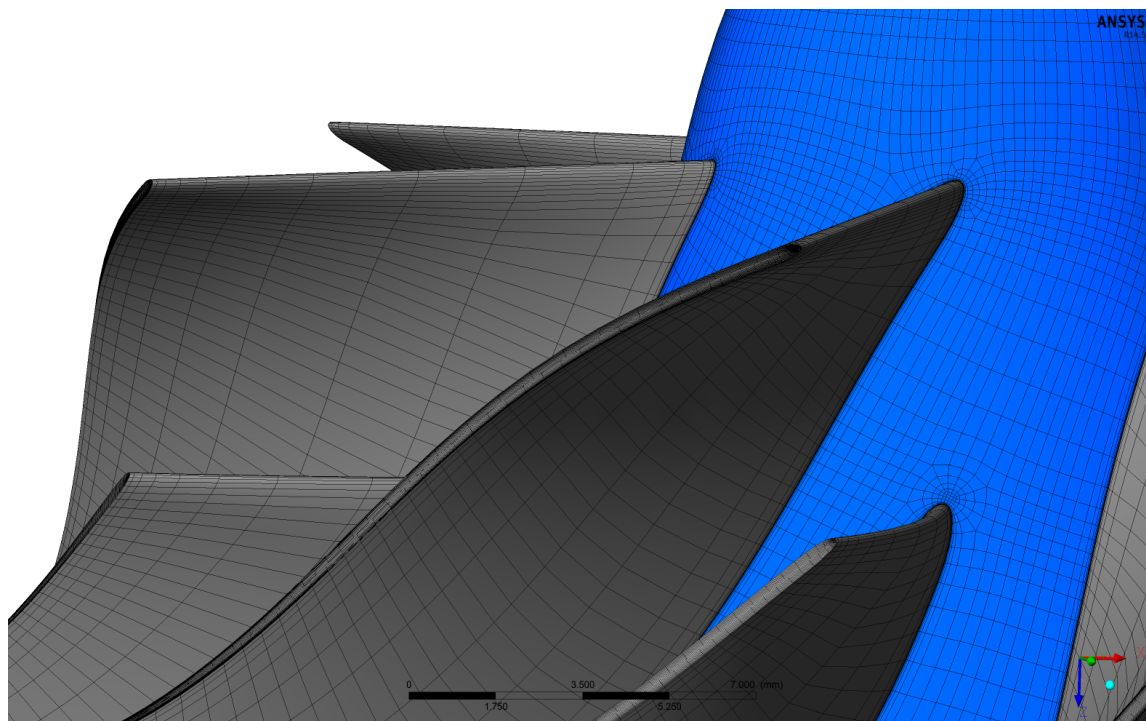
四面体

# 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：

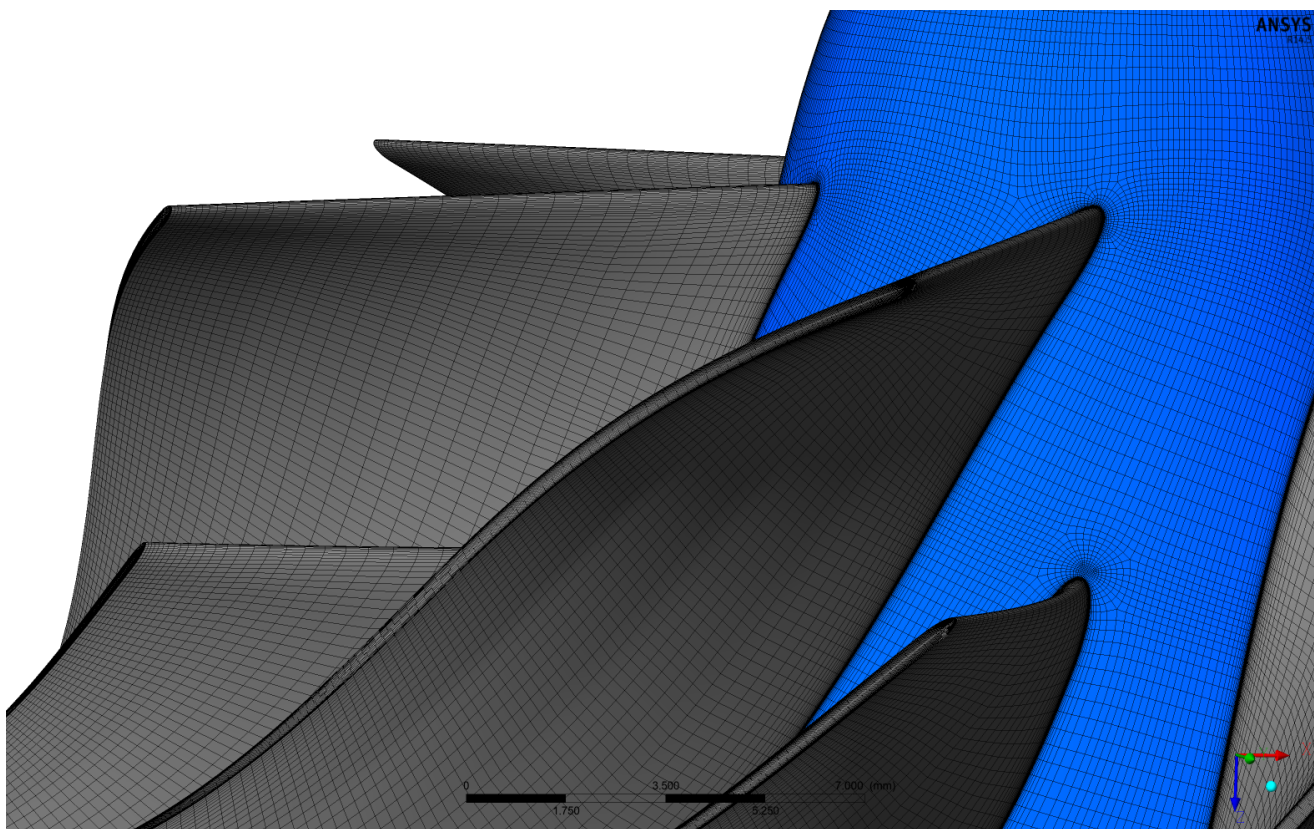
叶轮粗网格



涡轮增压器分析典例

单纯叶轮分析：

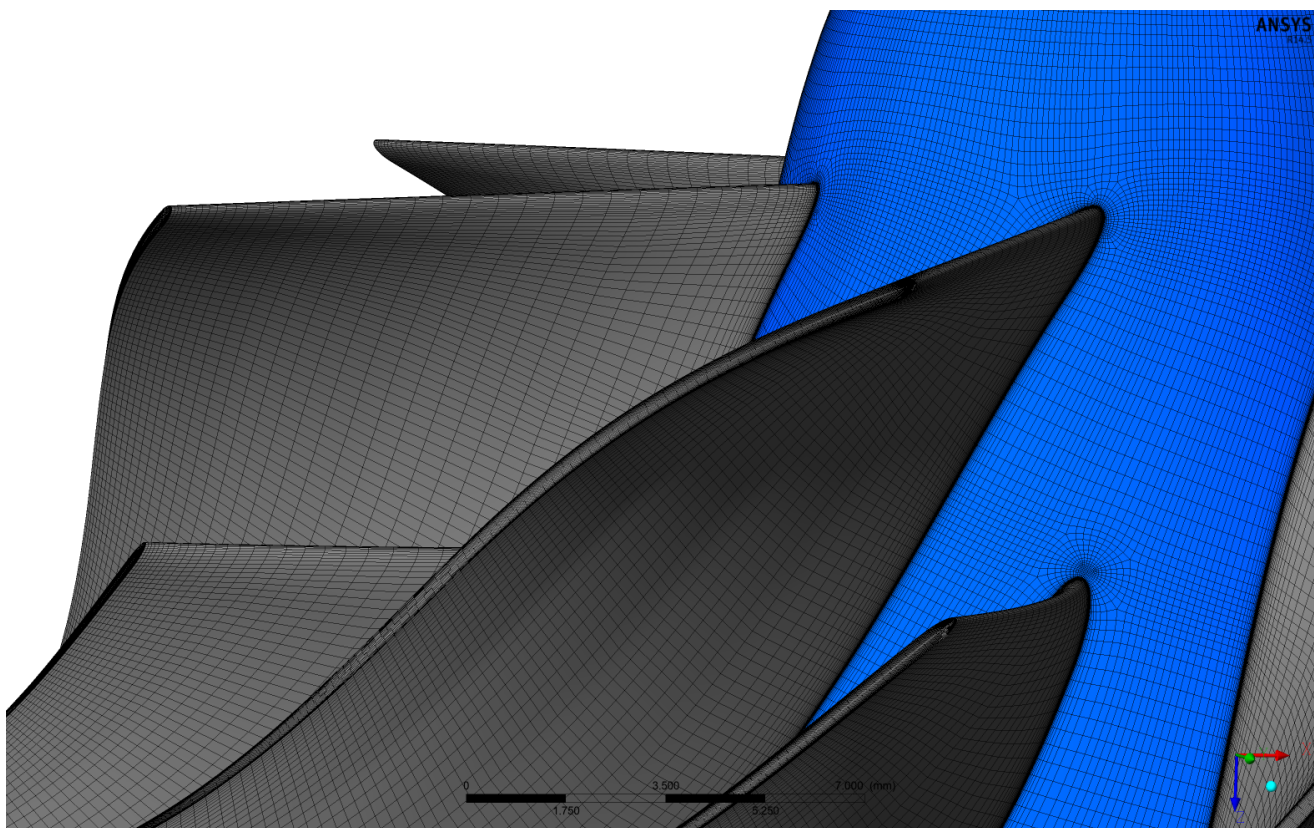
叶轮中等密度网格



涡轮增压器分析典例

单纯叶轮分析：

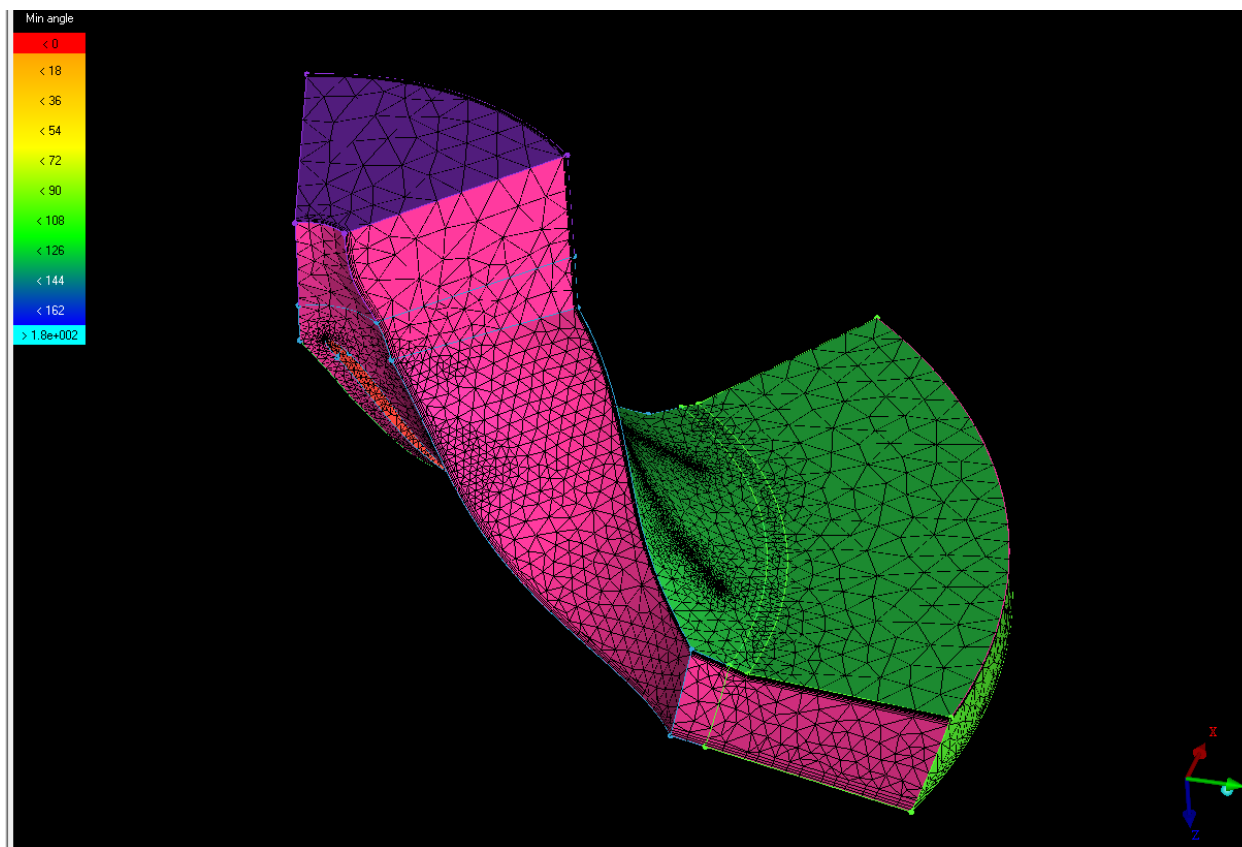
叶轮细化的网格



涡轮增压器分析典例

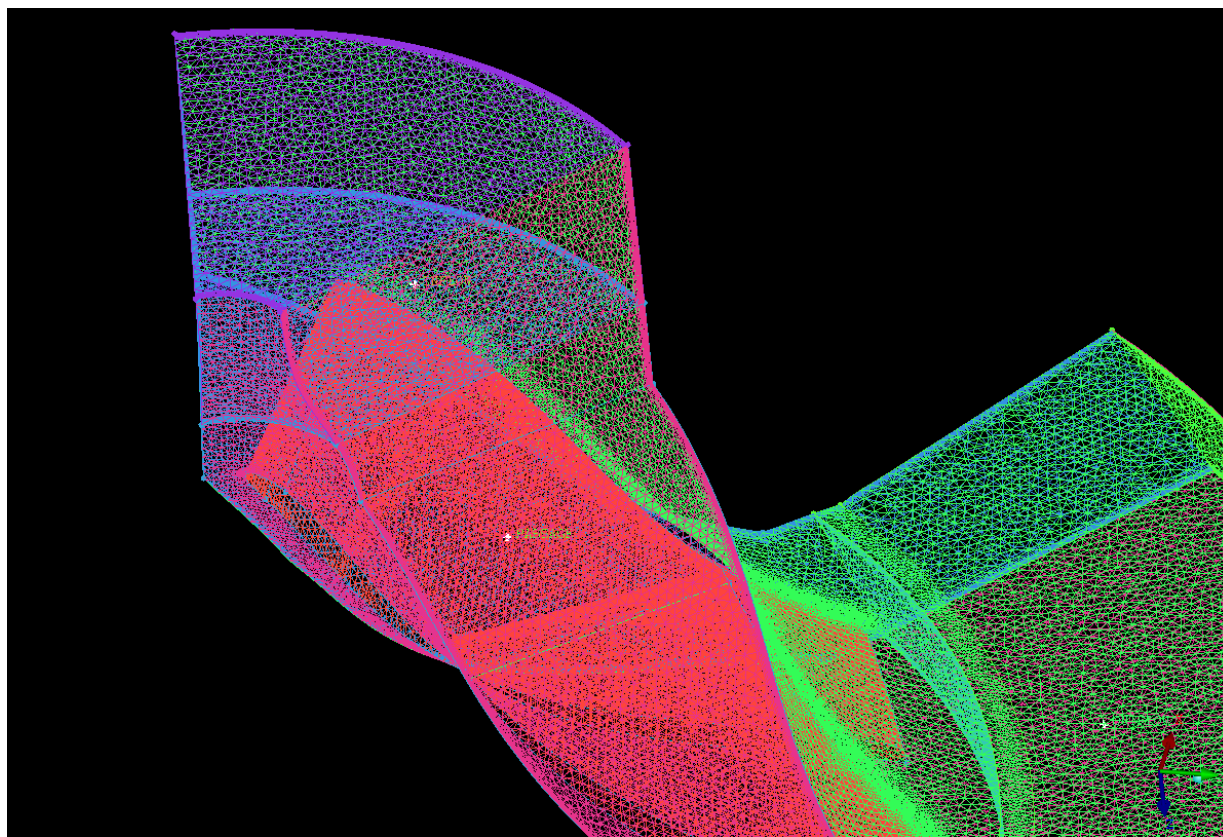
单纯叶轮分析：

粗密度的四面体网格



涡轮增压器分析典例

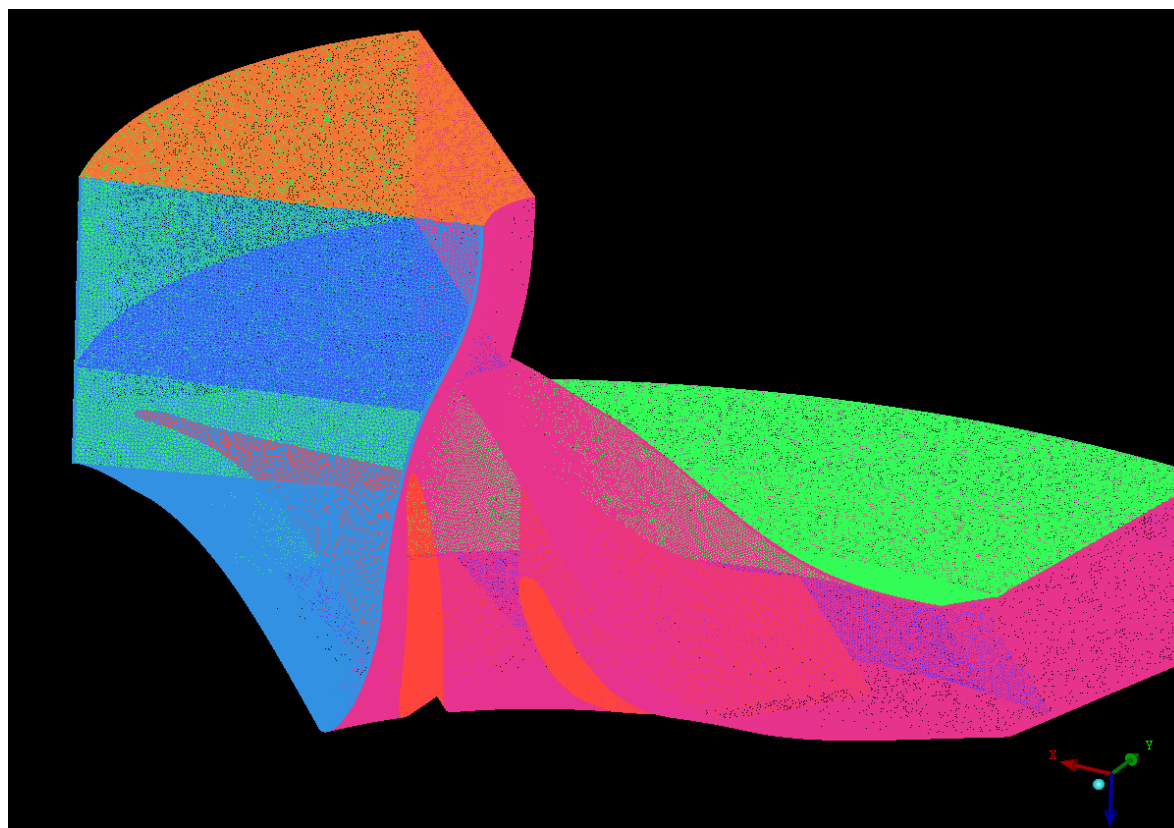
单纯叶轮分析：中等密度的四面体网格



涡轮增压器分析典例

单纯叶轮分析：

细化的四面体网格

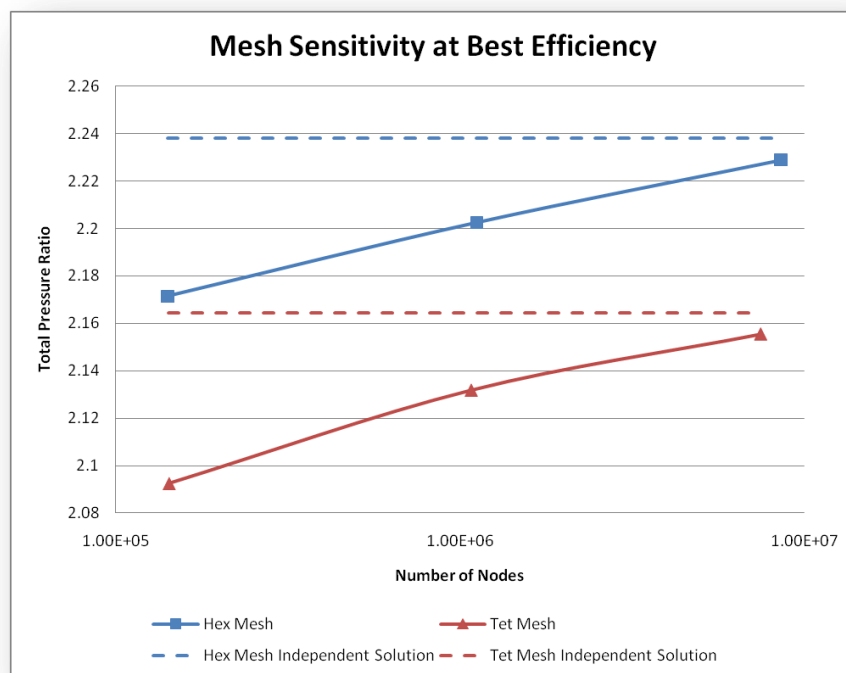


涡轮增压器分析典例

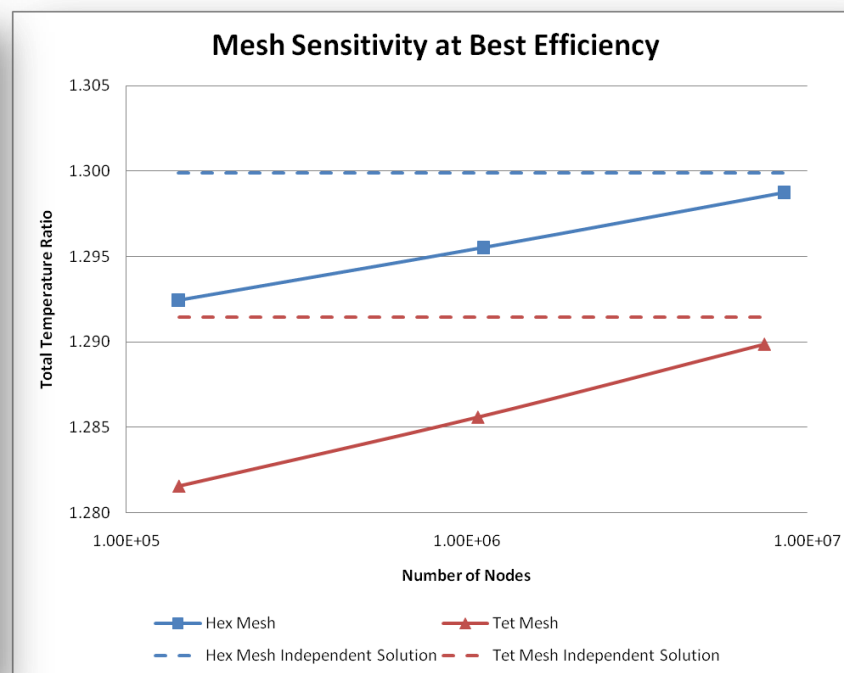
单纯叶轮分析：

六面体和四面体的网格无关性

总压



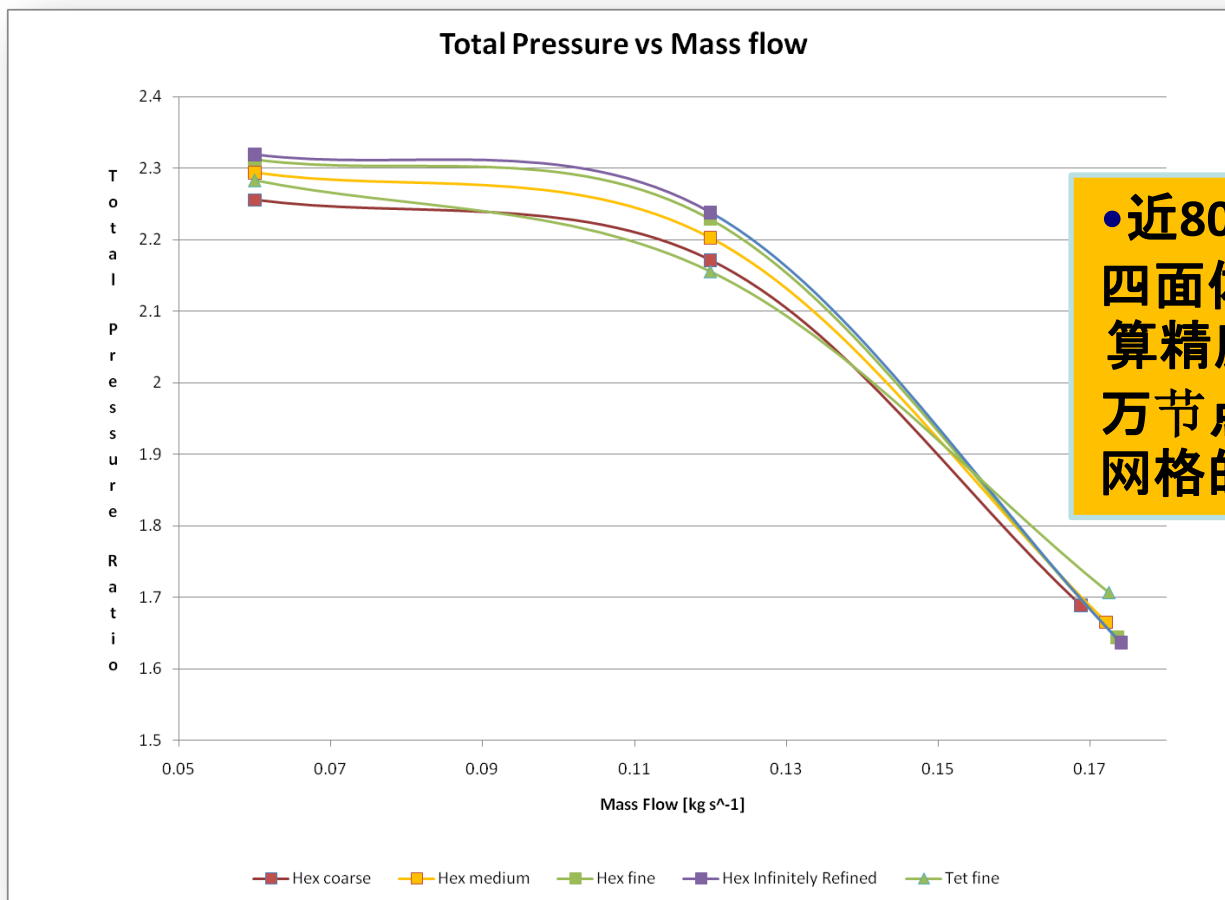
总温



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



• 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

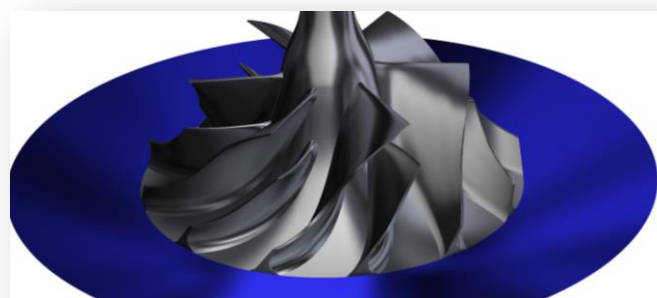
涡轮增压器分析典例

单纯叶轮分析：

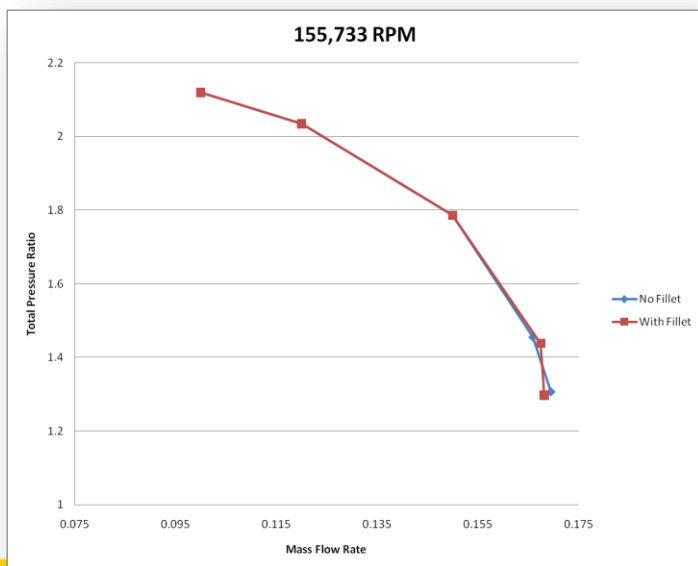
倒圆影响研究：对压比和效率的影响

在主叶片和分流叶片根部倒圆半径1.5 mm

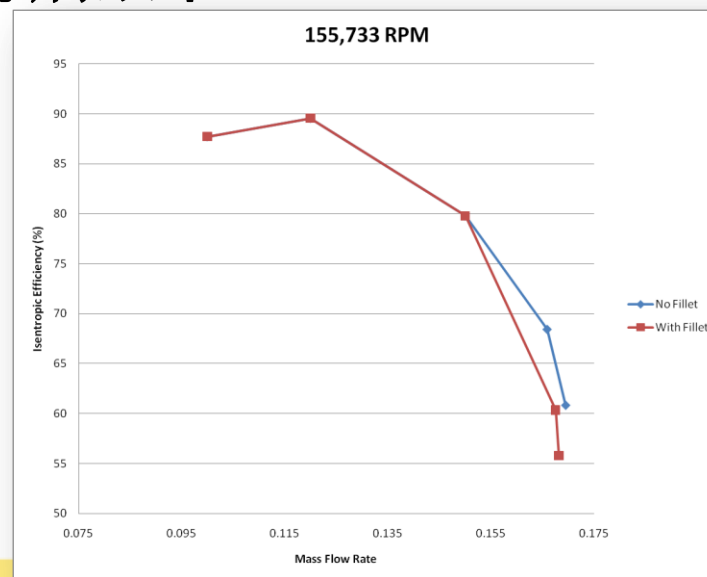
- 叶尖宽度约 4.5 mm
- 倒圆叶片和非倒圆叶片比较



总压比



等熵效率



涡轮增压器分析典例

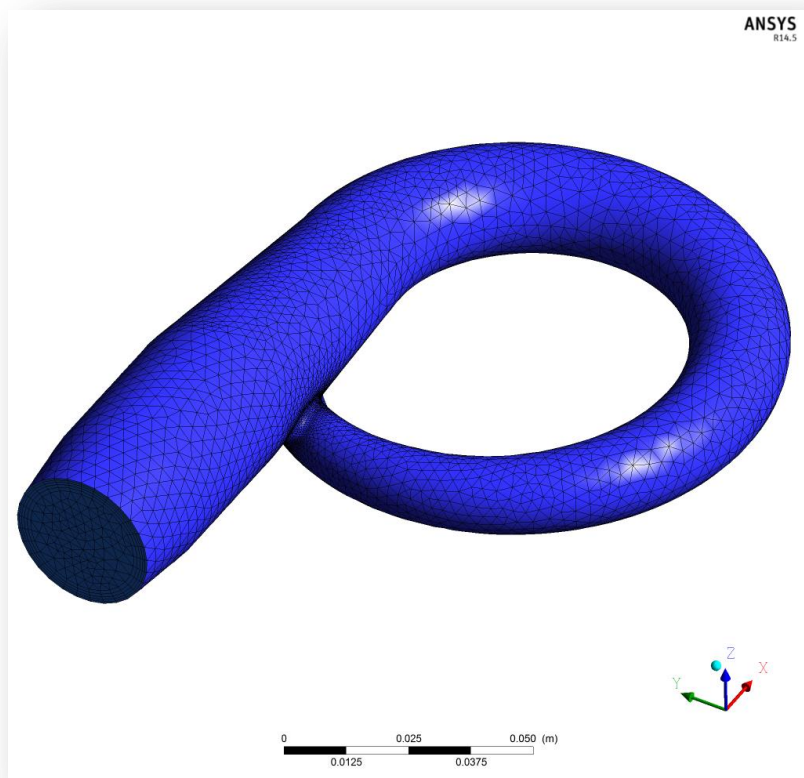
部件分析：

- 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



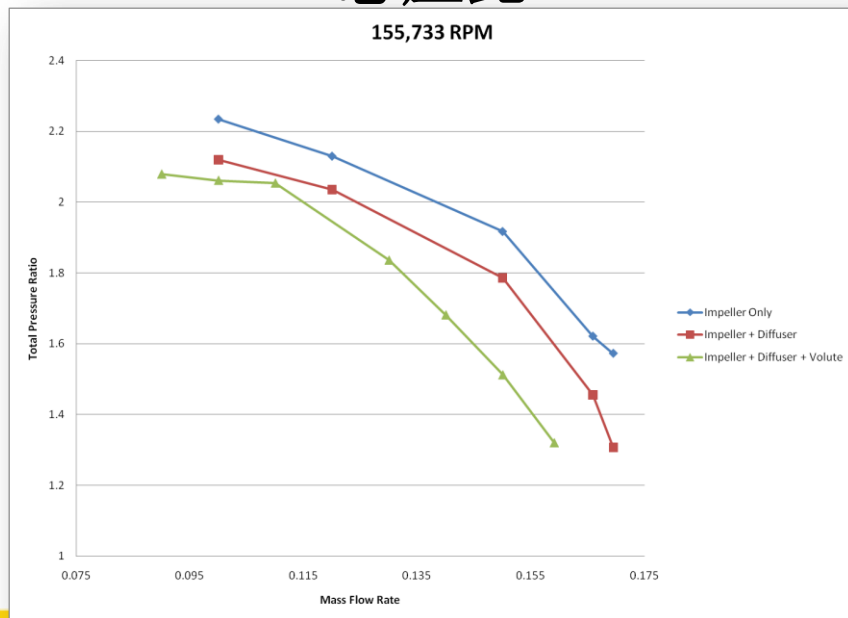
- 相对较粗的网格用于研究
- 网格大小: 370,000 节点
 - 四面体网格 = 1.1 百万
 - 三棱柱网格 = 0.32 百万
- 网格质量统计
 - 平均网格质量 = 0.71
 - 最差网格质量 = 0.046

涡轮增压器分析典例

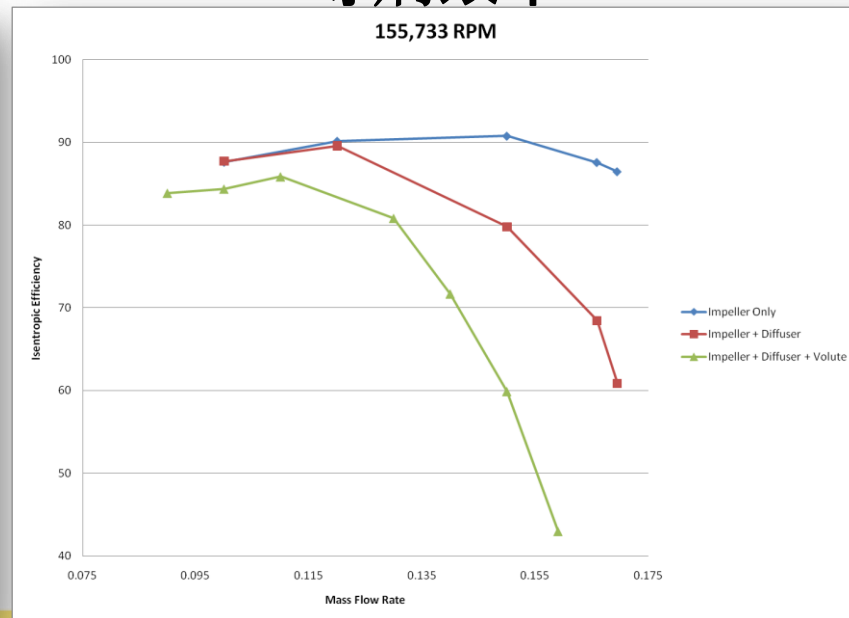
部件分析： 增加扩压器和涡壳后的影响

- 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

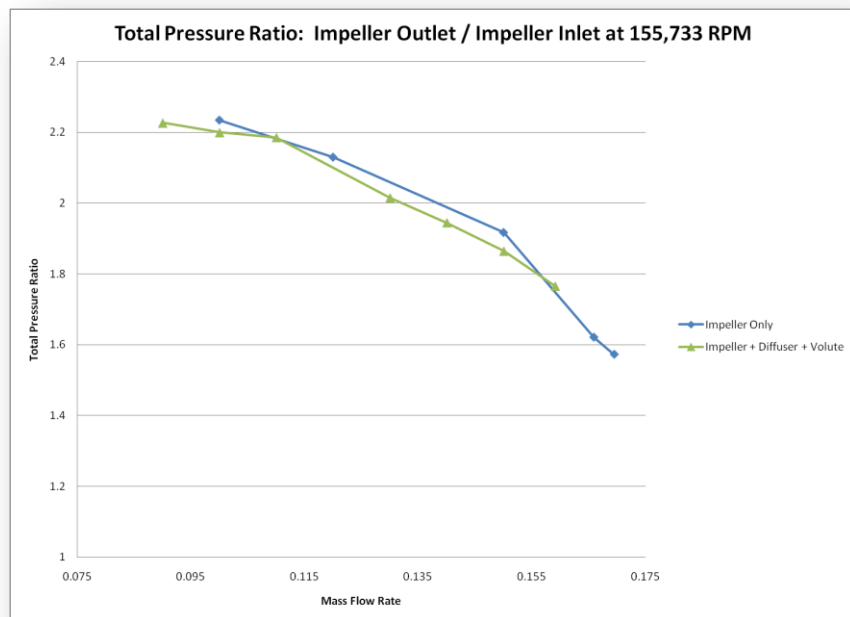
- 从两种几何构型关注叶轮的性能
 - 单纯叶轮模拟
 - 叶轮-扩压器-涡壳模拟
- 叶轮性能相似，而不受叶轮下游所谓几何形状的影响
 - 总压 比 = (叶轮出口总压/叶轮入口总压)
 - 叶轮的等熵效率

涡轮增压器分析典例

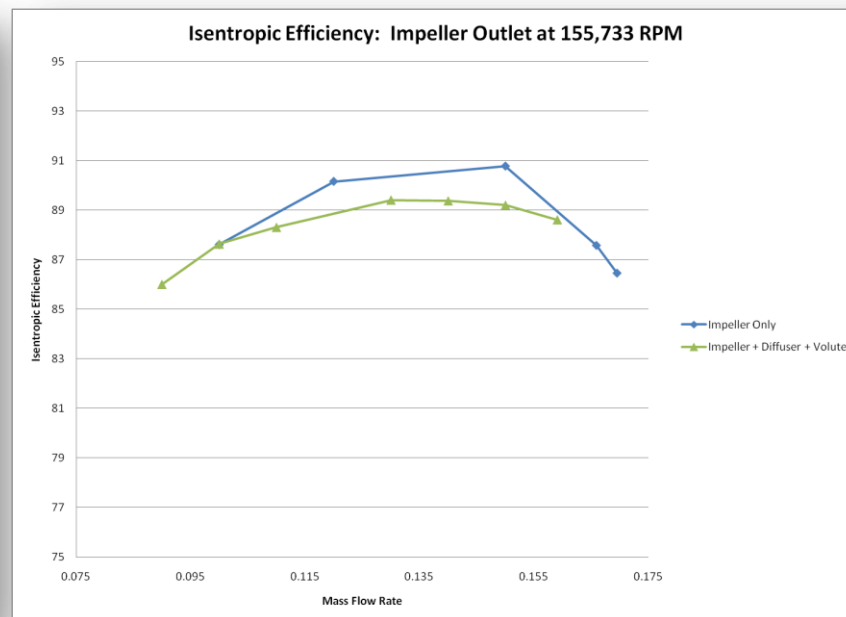
部件分析:

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

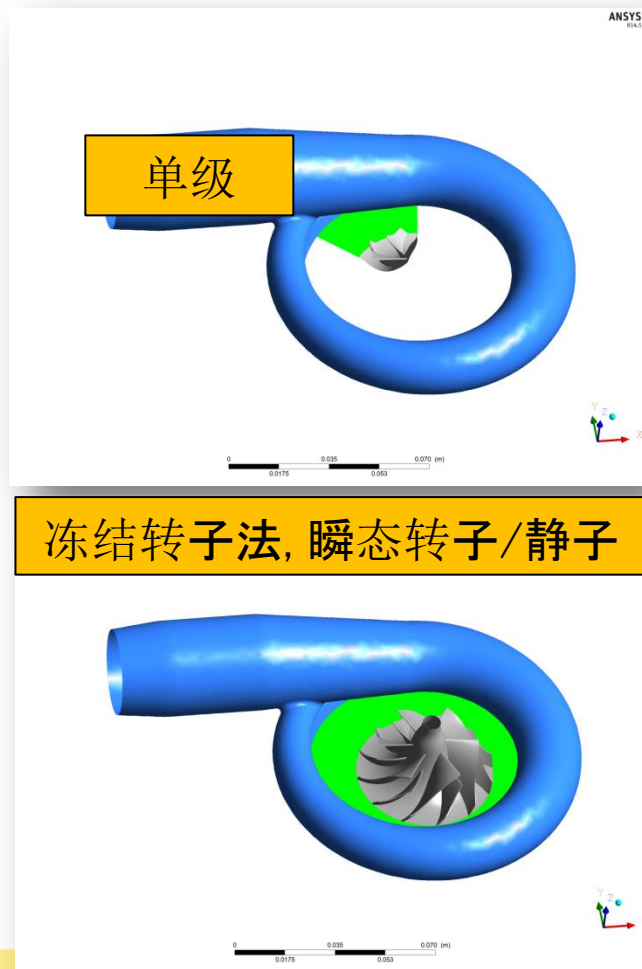


涡轮增压器分析典例

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



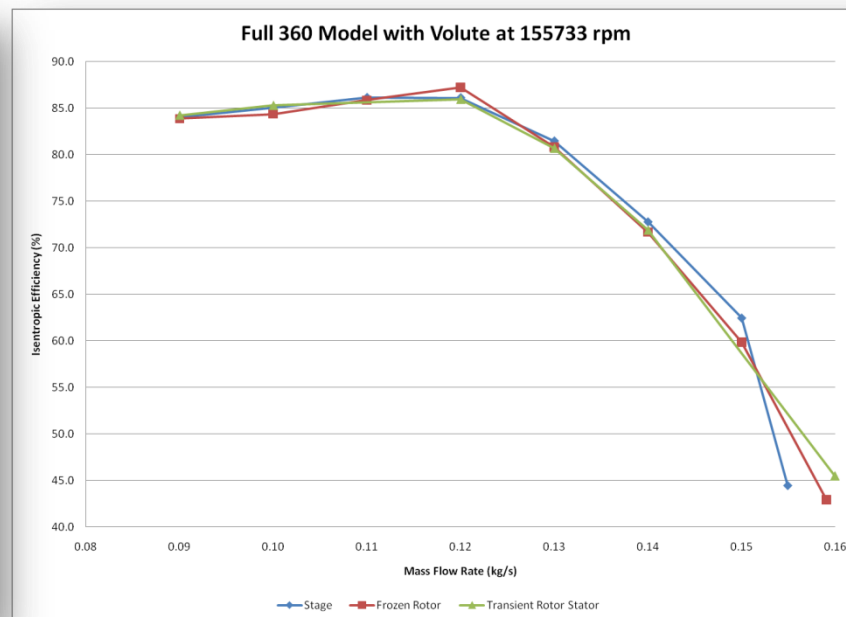
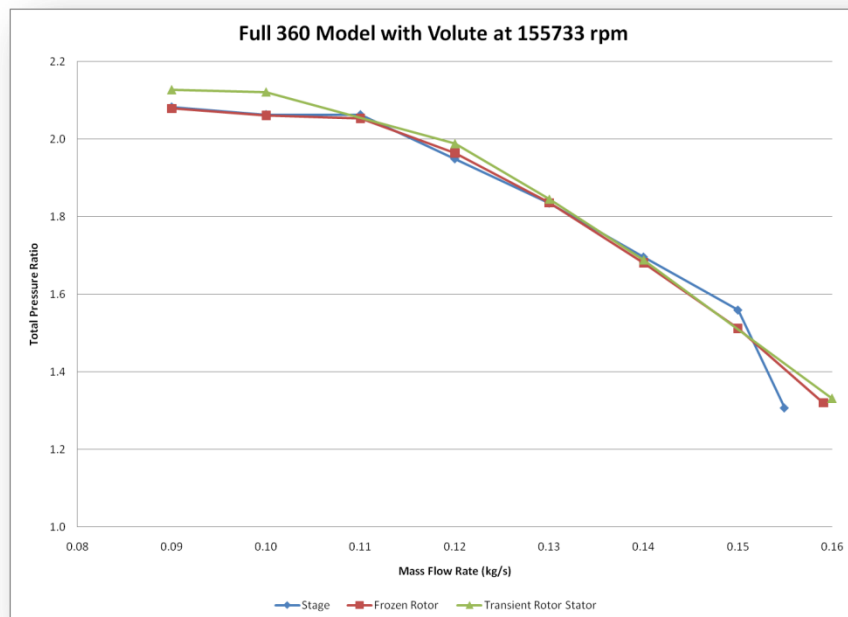
涡轮增压器分析典例

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

3. Component Summary Data

The table(s) below give a summary of the mass or area averaged solution variables and derived quantities computed at the inlet, leading edge (LE Cut), trailing edge (TE Cut) and outlet locations. The flow angles Alpha and Beta are relative to the meridional plane.

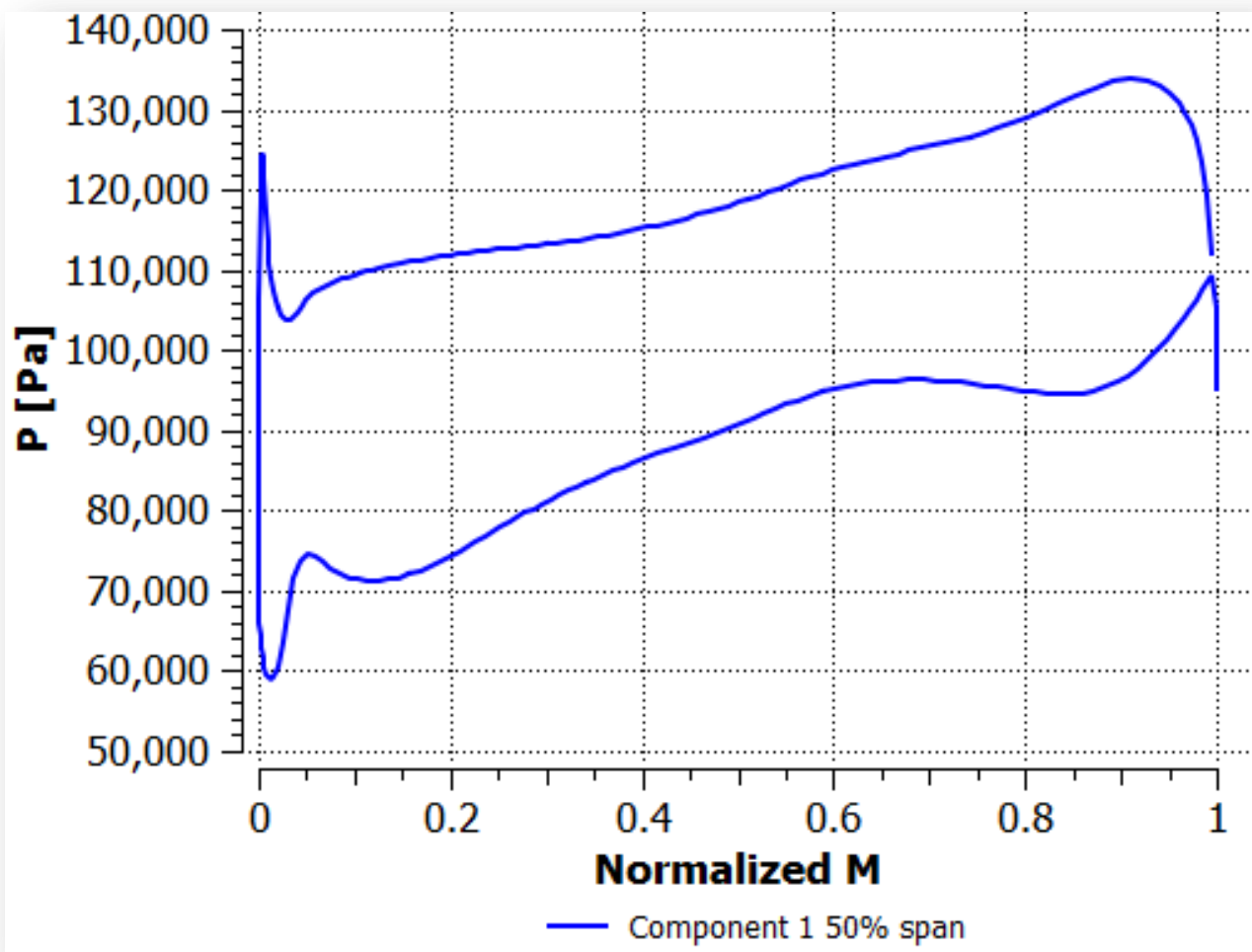
Table 5. Component 1 Summary Data Table

Quantity	Inlet	LE Cut	TE Cut	Outlet	TE/LE	TE-LE	Units
Density	1.1089	1.0799	1.3447	1.5828	1.2452	N/A	[kg m ⁻³]
Pstatic	93300.4000	90134.8000	128035.0000	159661.0000	1.4205	37900.5000	[Pa]
Pt	101313.0000	101827.0000	181951.0000	178386.0000	1.7869	80124.8000	[Pa]
Pt (rot)	101253.0000	101027.0000	89753.5000	90984.4000	0.8884	-11273.0000	[Pa]
T	292.9890	289.4590	327.4880	350.0570	1.1314	38.0291	[K]
Tt	300.0330	300.1920	367.0030	363.6960	1.2226	66.8113	[K]
Tt (rot)	299.9800	299.9770	300.0070	300.0080	1.0001	0.0296	[K]
H	-5183.8400	-8729.4000	29467.0000	52135.4000	-3.3756	38196.4000	[J kg ⁻¹]
Ht	1891.2300	2051.0900	69156.4000	65834.0000	33.7169	67105.3000	[J kg ⁻¹]
Rothalpy	1837.7000	1835.4900	1865.2200	1865.7000	1.0162	29.7294	[J kg ⁻¹]
Entropy	6.3628	6.8665	23.3377	30.9408	3.3988	16.4712	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]
Mach (abs)	0.3444	0.4204	0.7093	0.3887	1.6872	0.2889	
Mach (rel)	0.6692	0.7293	0.7416	1.4711	1.0169	0.0123	
U	194.6700	205.4630	376.3680	640.8720	1.8318	170.9050	[m s ⁻¹]
Cm	118.1890	138.0610	174.8200	99.2333	1.2663	36.7586	[m s ⁻¹]
Cu	0.1324	2.2381	179.4180	99.4995	80.1651	177.1800	[m s ⁻¹]
C	118.1910	143.2490	258.6340	146.0000	1.8055	115.3850	[m s ⁻¹]
Wu	-194.5380	-203.2270	-196.9500	-541.3720	0.9691	6.2772	[m s ⁻¹]
W	229.6240	248.2910	269.9690	552.6830	1.0873	21.6781	[m s ⁻¹]
Distortion Parameter	1.0141	1.0594	1.0865	1.1612	1.0255	N/A	
Flow Angle: Alpha	0.0531	2.4051	52.3450	48.9048	N/A	49.9400	[degree]
Flow Angle: Beta	-56.6923	-53.7731	-14.3375	-71.8535	N/A	39.4356	[degree]

涡轮增压器分析典例

后处理:

Mass flow = 0.13 kg/s的叶片载荷图

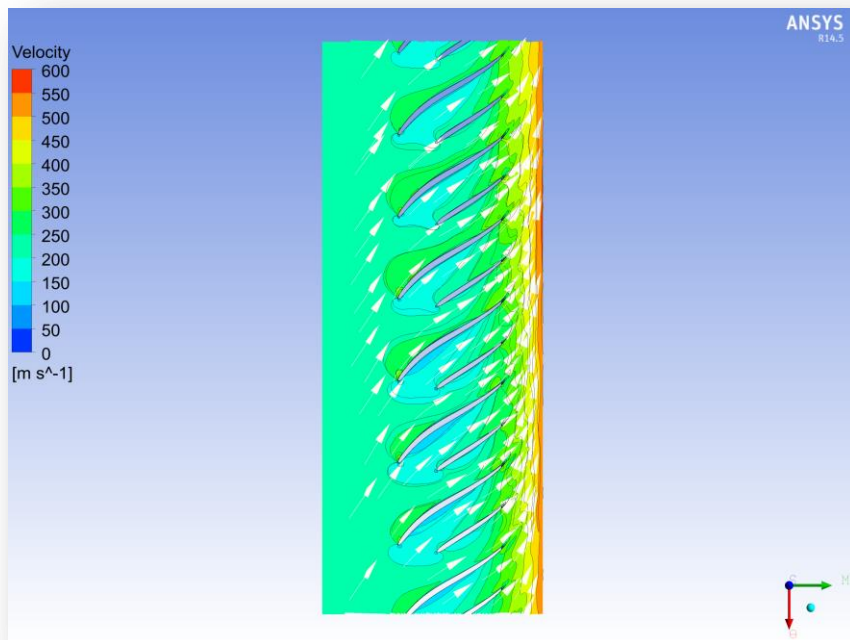


涡轮增压器分析典例

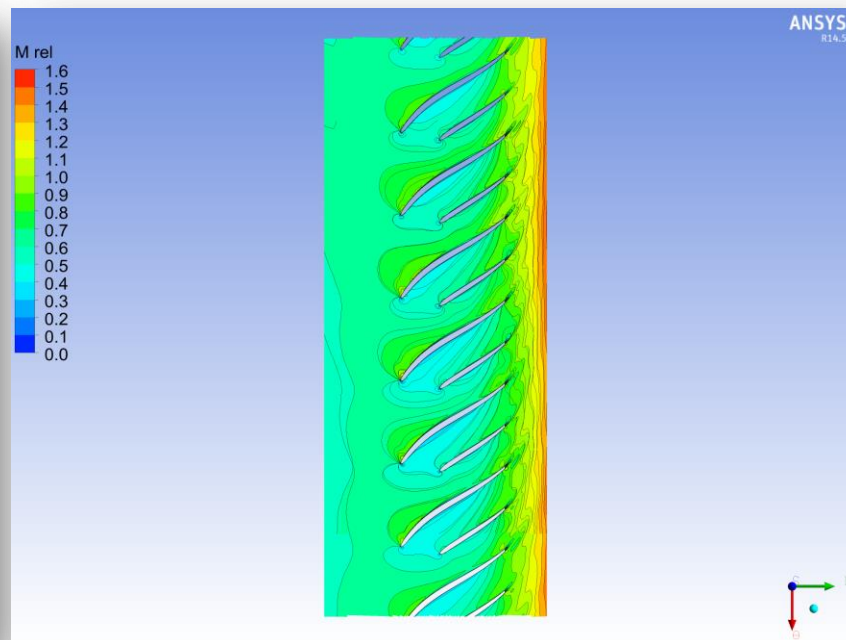
后处理:

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

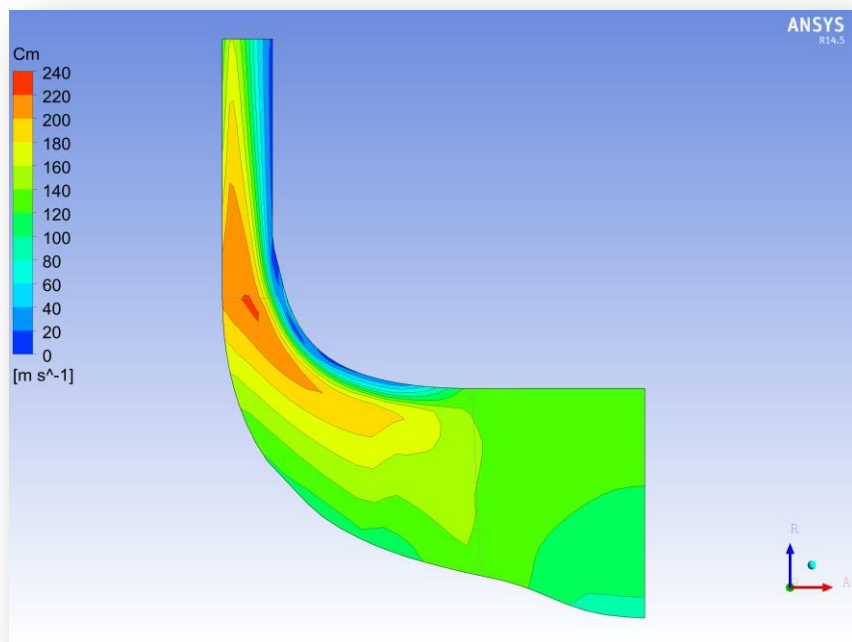


涡轮增压器分析典例

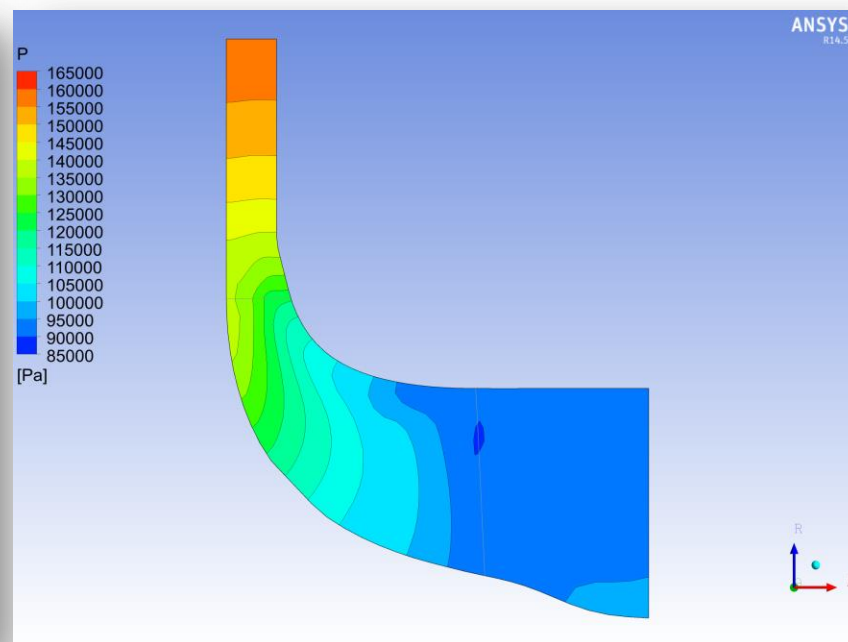
后处理:

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

