

ANSYS®



ANSYS中国技术大会
中国·上海

ANSYS Fluent流体仿真设计快速优化方法

Adjoint Solver和Mesh Morpher Optimizer培训

- 崔亮 / 行业专员
- 安世亚太科技股份有限公司

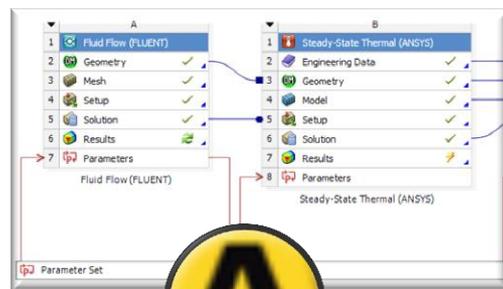
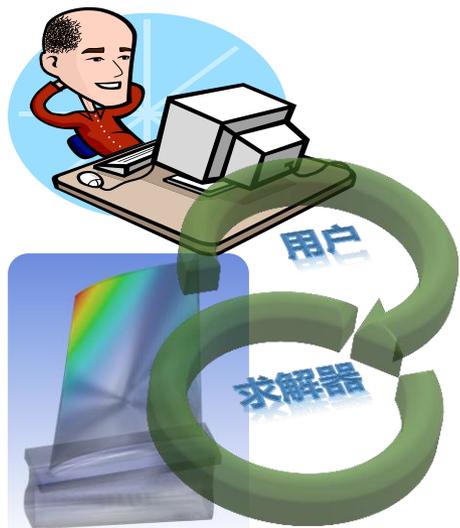
优化方法



手工优化

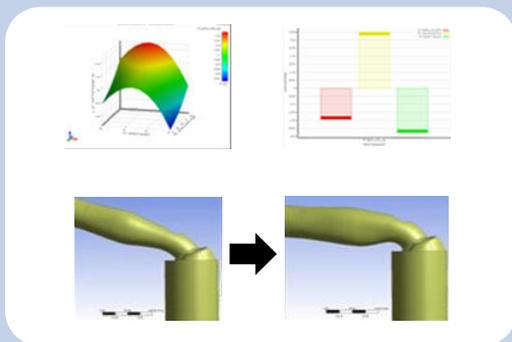
参数化优化

伴随求解器优化



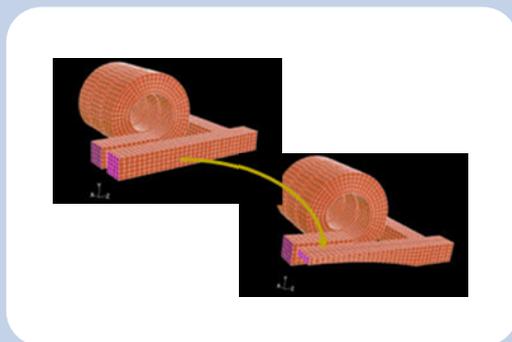
优化方法

Design Exploration



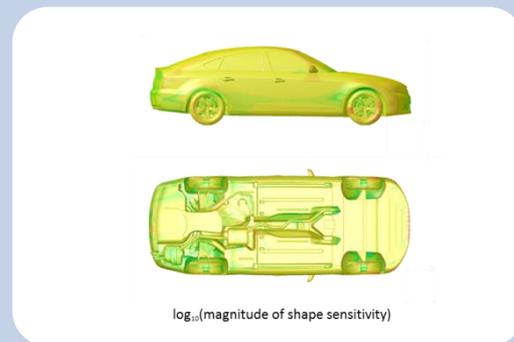
- 基于Workbench的完整仿真流程
- 多物理场
- 确定性和概率性分析
- 可以和Mesh Morpher、RBF Morph耦合，引入网格变形

Mesh Morpher Optimizer



- 基于自由变形方法的独立网格变形工具
- 将Mesh Morpher和不同的优化方法进行耦合
- 支持Fluent所有的模型
- 无需额外的license

Adjoint Solver



- 广泛的设计空间
- 详细的敏感性分析
- 创新性的基于梯度的外形优化方法
- 无需额外的license

参数化

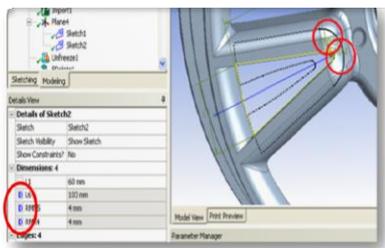
非参数化

创新性的设计

优化方法的优缺点



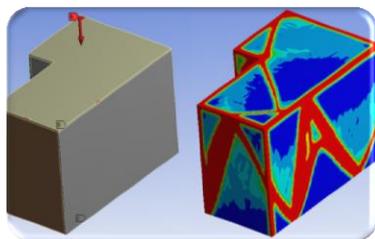
参数化优化



- 使用**CAD**、网格划分工具、求解器已经建立好的仿真分析流程
- 自动化的插件工具
- 没有“无意义”的结果
- 最优设计可以直接得到**CAD**模型

- 优化变量“仅限于”所定义的参数
- 需要重复进行许多轮次的求解过程

非参数化优化



- 自由变形无限制
- 创新性的
- 在求解器内完成优化

- 优化过的设计不能直接得到**CAD**模型（还需要借助逆向工程等方法）
- 不便于直接进行制造和生产

ANSYS®



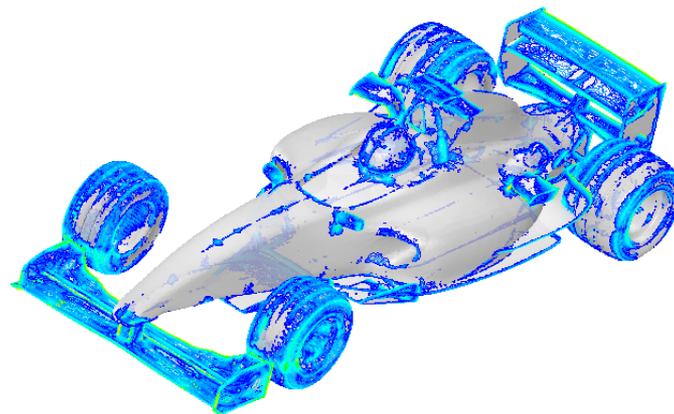
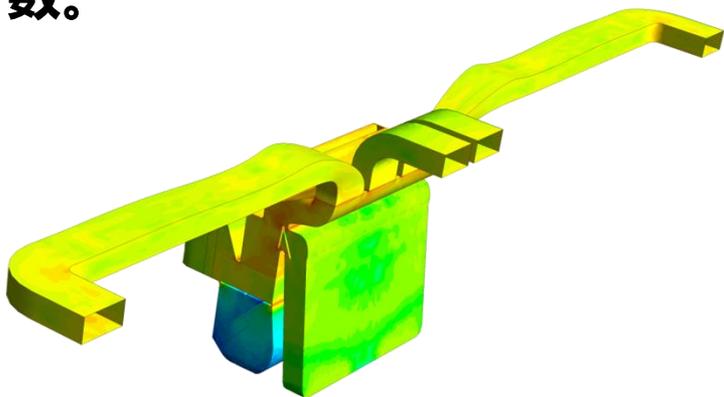
ANSYS
ONVERGENCE
CONFERENCES

2016 | ANSYS中国技术大会
中国·上海

Adjoint Solver

什么是Adjoint Solver ?

- Adjoint Solver (伴随求解器) 是Fluent中的一个专用工具, 它扩展了传统流体求解器的分析范畴, 能够提供一个流体系统详细的性能敏感性数据。
- Adjoint Solver可以用来计算一个工程量相对于所有系统输入的导数。



- Adjoint Solver的求解结果得到后, 即可基于简单的梯度算法, 对系统进行智能的设计改进, 从而实现设计优化。

Adjoint Solver结果数据的重要性

洞察力

识别影响性能的最重要的因素。

稳健设计

综合识别最有影响力的设计参数。

设计探索

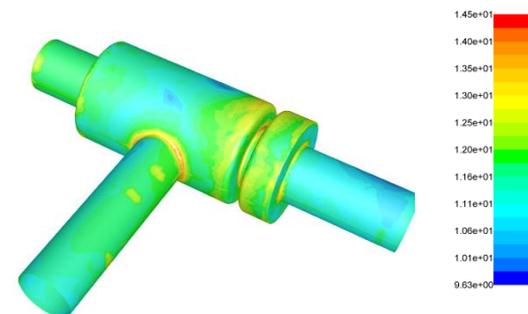
指定的外形变化将会如何改变性能？

优化

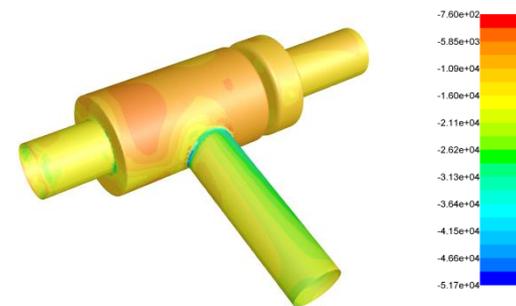
使用梯度数据对性能进行系统地改进。

稳健仿真

数值方法及格式对网格节点位置的敏感性。



Sensitivity to Body Forces



Sensitivity to Mass Sources

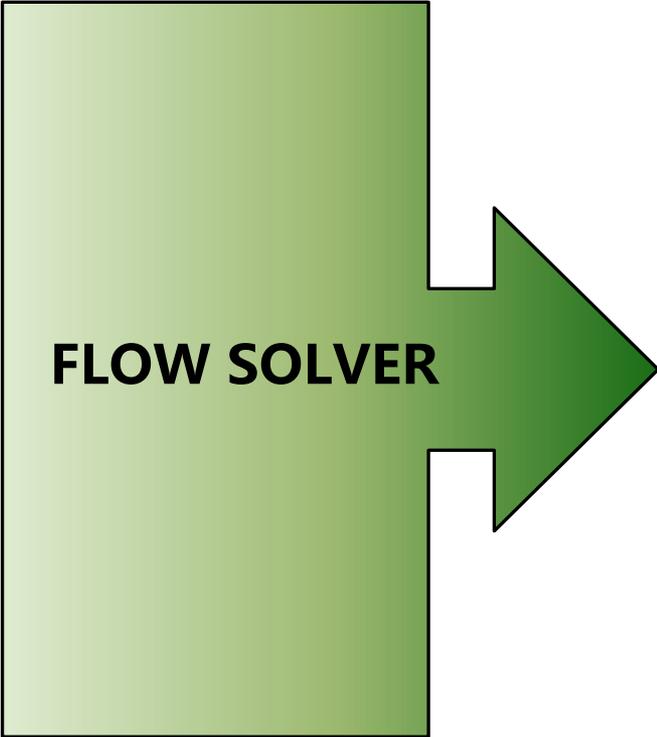
Adjoint Solver的基本理念

• 传统的流体求解器

Inputs

- Boundary mesh
- Interior mesh
- Material properties
- Boundary condition 1
 - Flow angle
 - Inlet velocity
 - ...
- ...

FLOW SOLVER

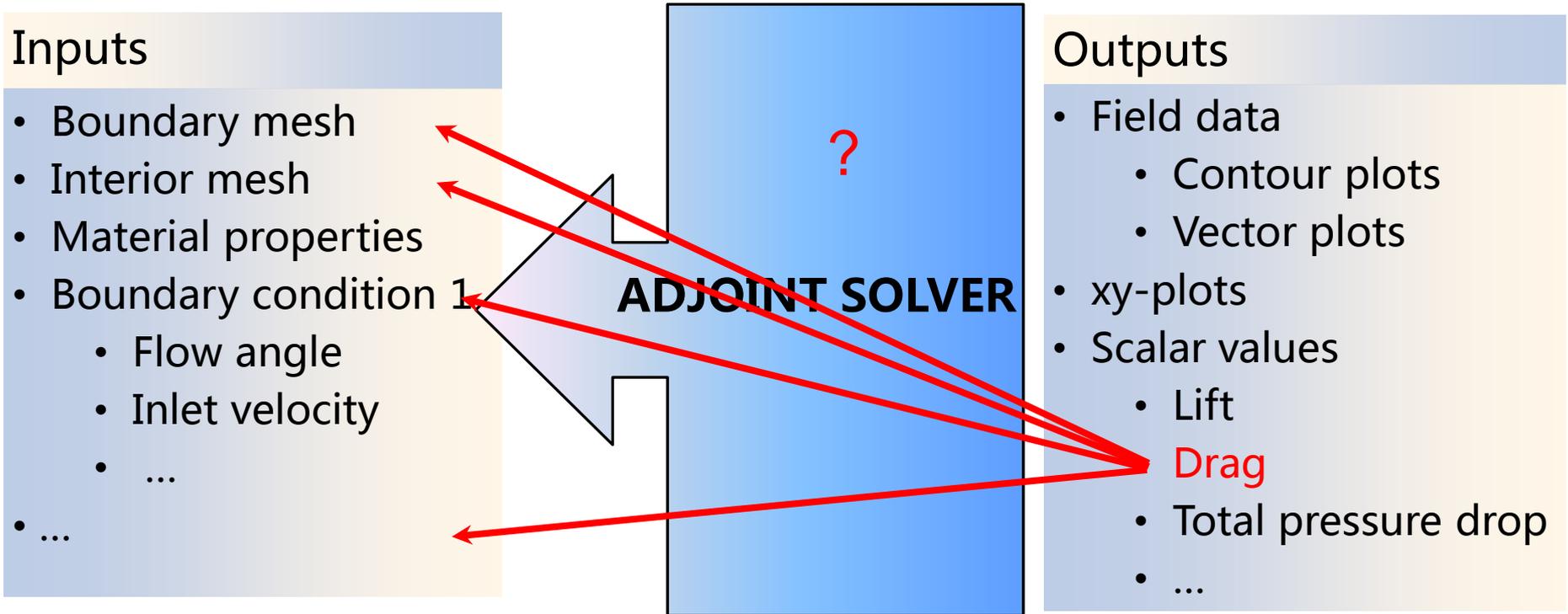


Outputs

- Field data
 - Contour plots
 - Vector plots
- xy-plots
- Scalar values
 - Lift
 - Drag
 - Total pressure drop
 - ...

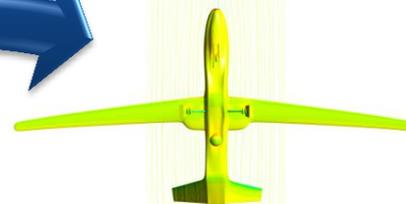
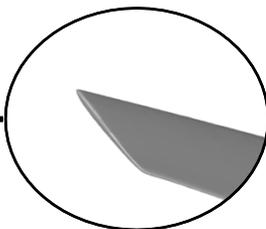
Adjoint Solver的基本理念

- 输出数据会随着输入数据的变化而变化？



Adjoint Solver的工作流程

优化过的设计



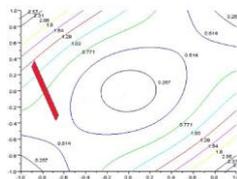
CFD分析



$$\begin{bmatrix} \frac{\partial q_i}{\partial c_j} \end{bmatrix}$$

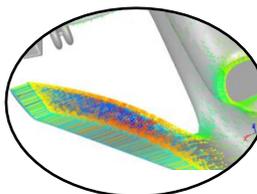
Adjoint Solver

优化



局部最优

手动还是自动优化?
 是否有设计约束?
 单目标还是多目标?
 是否有指定的运动?

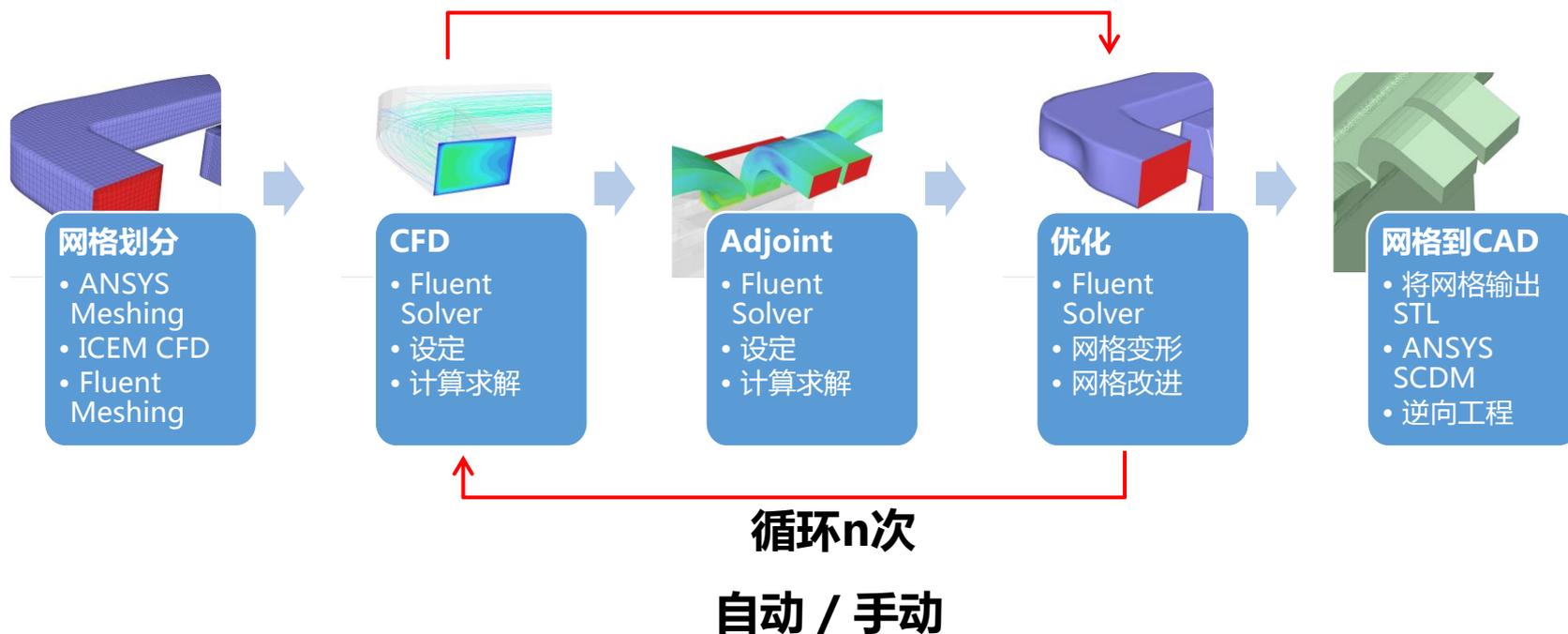


分析伴随求解器的结果



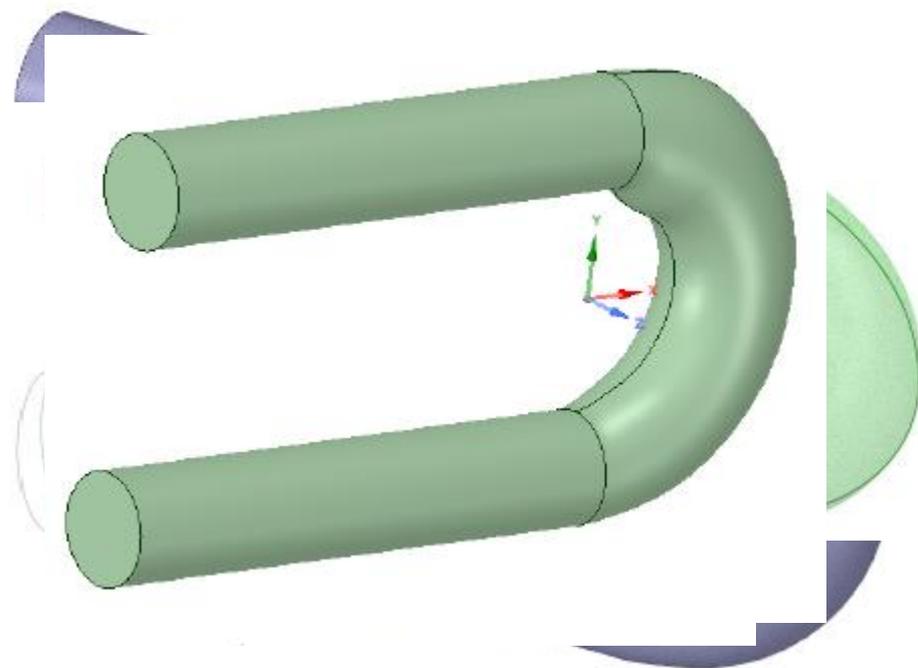
Adjoint Solver的工作流程

- 一个完整的优化循环，还需要有一种有效的方法，来实现变形过后的网格到CAD的转换。



逆向工程 —— 网格到CAD的转换

- **基于ANSYS SCDM的逆向工程**
 - 变形后的表面网格以STL格式导入ANSYS SCDM
 - 截取不同几何位置处的轮廓线
 - 将轮廓线依次按照顺序进行放样（Loft），生成光滑曲面
 - 生成CAD



Shape Sensitivity (形状敏感性)

- 形状敏感性：目标量相对于（边界）网格节点位置的敏感性

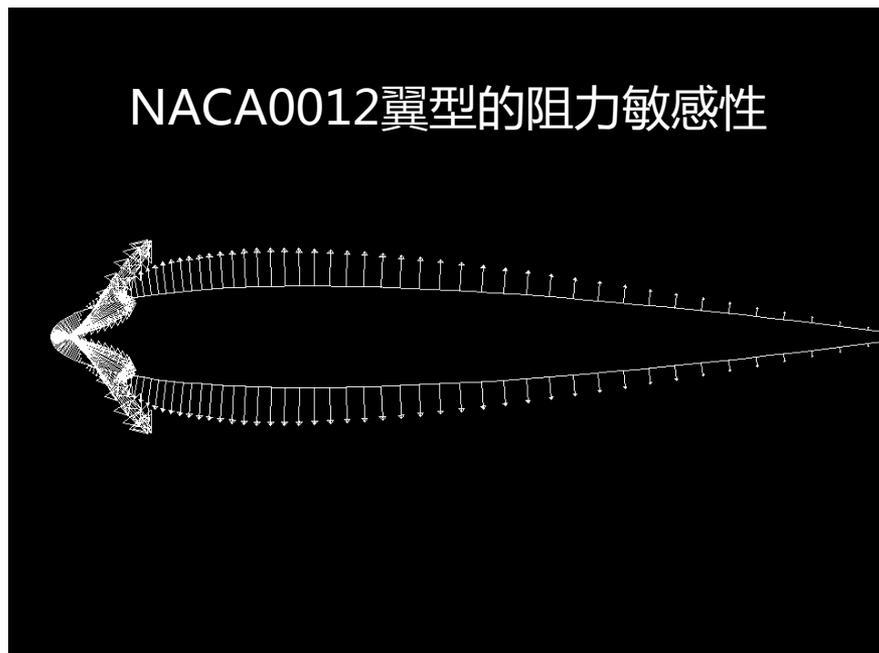
$$\delta(Drag) = \sum_{mesh} \underline{w}^n \cdot \delta \underline{x}^n$$

节点位移

形状敏感性系数：
定义在网格节点上的矢量场

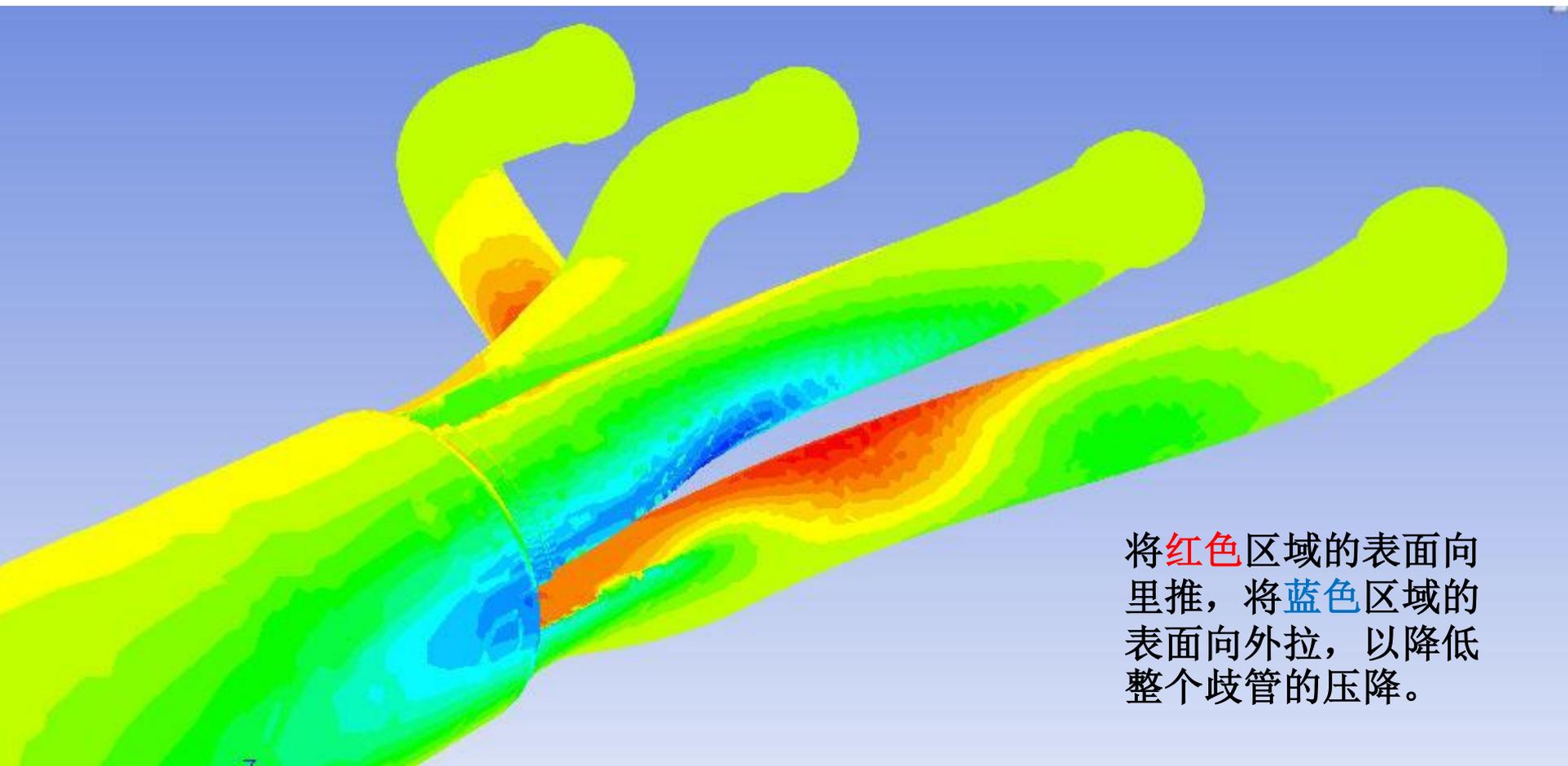
- 形状敏感性的可视化

- 使用矢量场来显示
- 识别计算域中的高敏感性和低敏感性区域
- 高敏感性区域就是改动这里的形状会对目标量带来显著影响
- 需要注意的是，形状敏感性的结果是针对于指定的目标量和当前的流动状态



Shape Sensitivity (形状敏感性)

- 将形状敏感性的结果以光顺云图的方式显示，对设计改进提供指导。



梯度算法和优化

$$\delta(Drag) = \sum_{mesh} \underline{w}^n \cdot \delta \underline{x}^n$$

• 如何确定节点的位移？

- 梯度算法
- 位移正比于局部的敏感性

选定的节点位移

$$\longrightarrow \delta \underline{x}^n = -\mu \underline{w}^n$$

用于网格变形的比例因子
(用户指定)

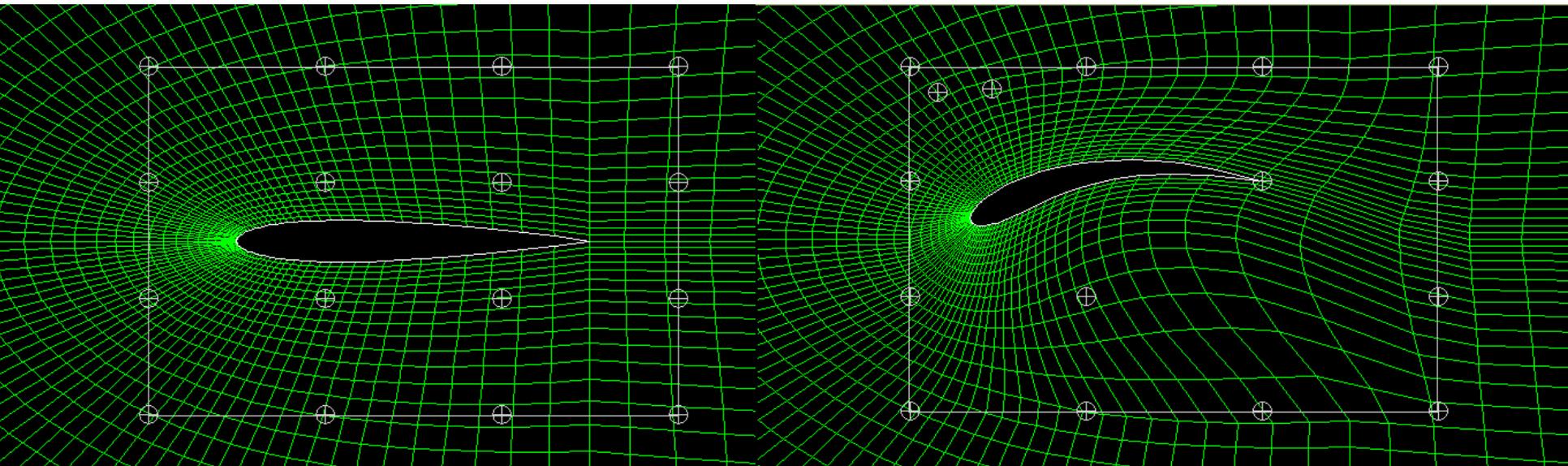
- 在网格发生真正的变形之前，提供目标量随着网格变形而导致的变化值的一阶估计。

目标量变化值的一阶估计

$$\longrightarrow \delta(Drag) = -\mu \sum_{mesh} \underline{w}^n \cdot \underline{w}^n$$

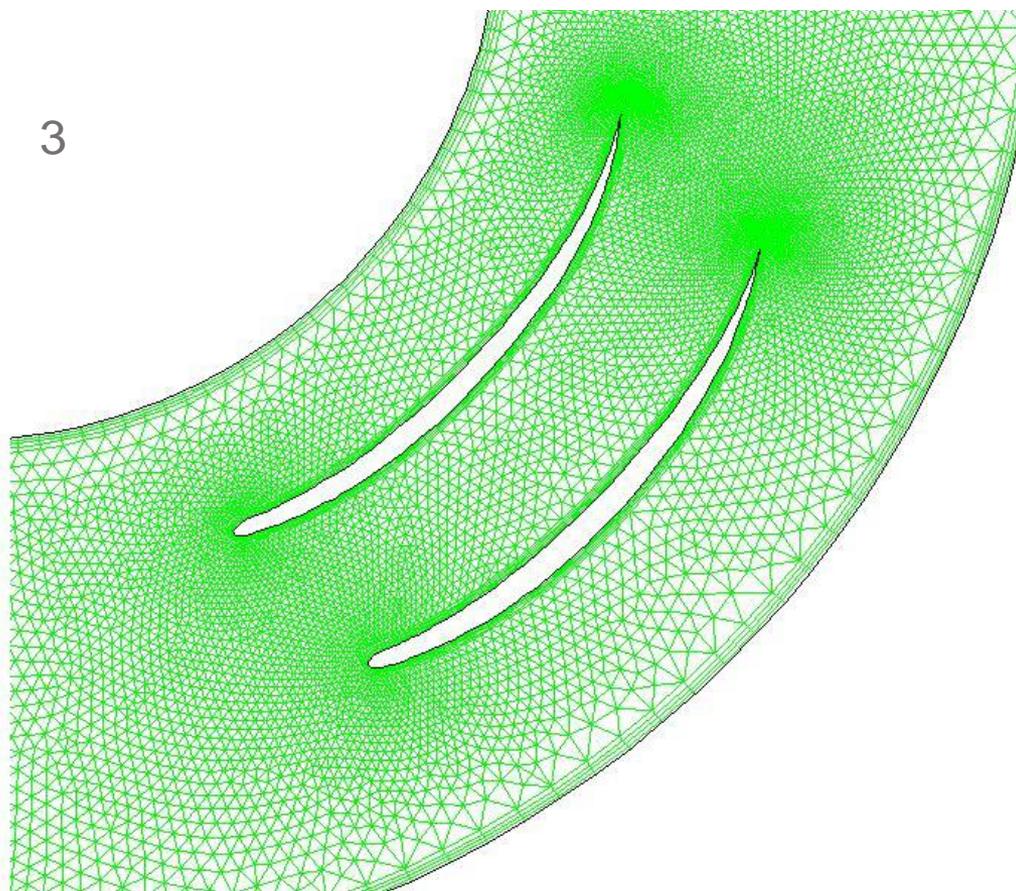
网格变形

- **如何将节点的位移应用到设计中？**
 - 使用基于Bernstein多项式的变形方案，实现自由形式的网格变形。
 - 支持所有的网格类型（ Tet/Prism, CutCell, HexaCore, Polyhedral ）。
 - 选择几何中需要发生变形的部分，定义沿着各坐标方向的控制点。
 - 每一个控制点的运动，会带动整个变形区域发生平滑光顺的变形。



Adjoint Solver案例：二维导向叶片设计

- 降低整个系统的压降 ΔP



$\Delta P = -232.8\text{Pa}$
预期变化 10.0Pa

实际变化 9.0Pa
 $\Delta P = -223.8\text{Pa}$
预期变化 8.9Pa

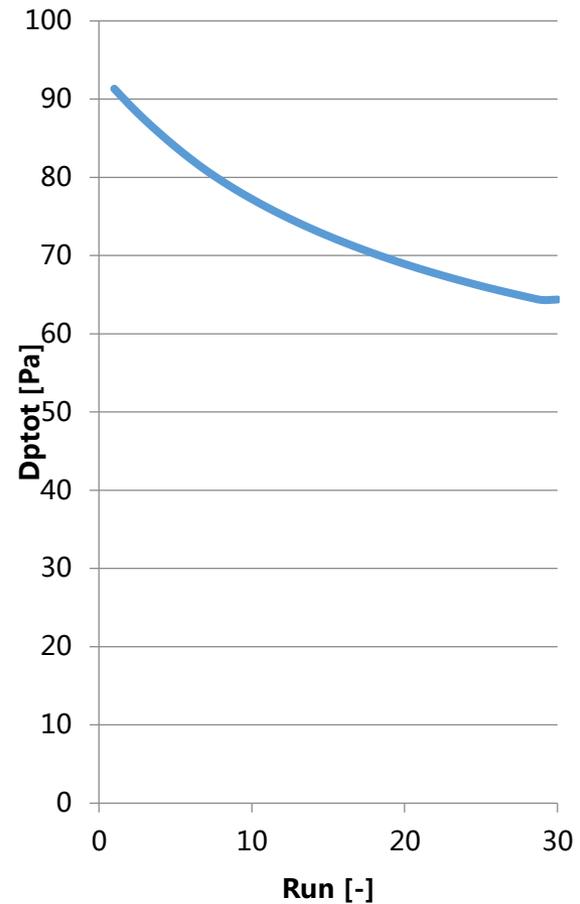
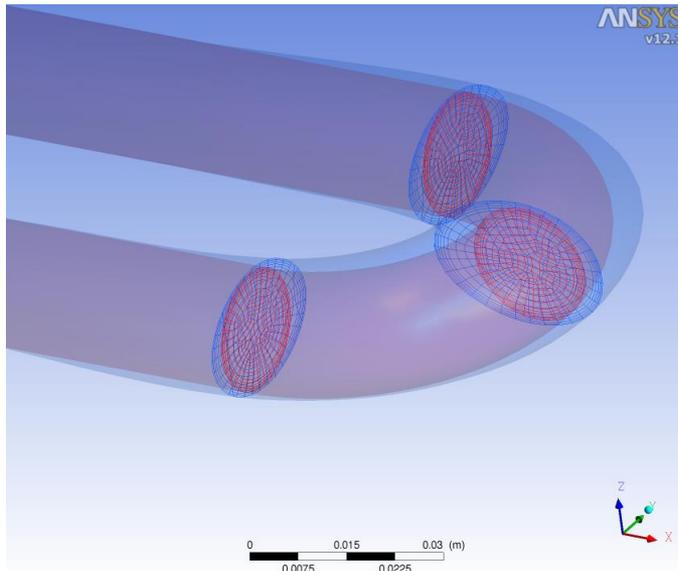
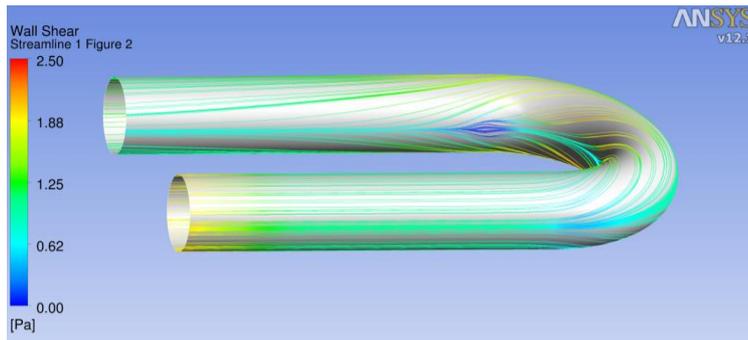
实际变化 6.9Pa
 $\Delta P = -216.9\text{Pa}$
预期变化 7.0Pa

实际变化 3.1
 $\Delta P = -213.8$

总计降低8%的压降

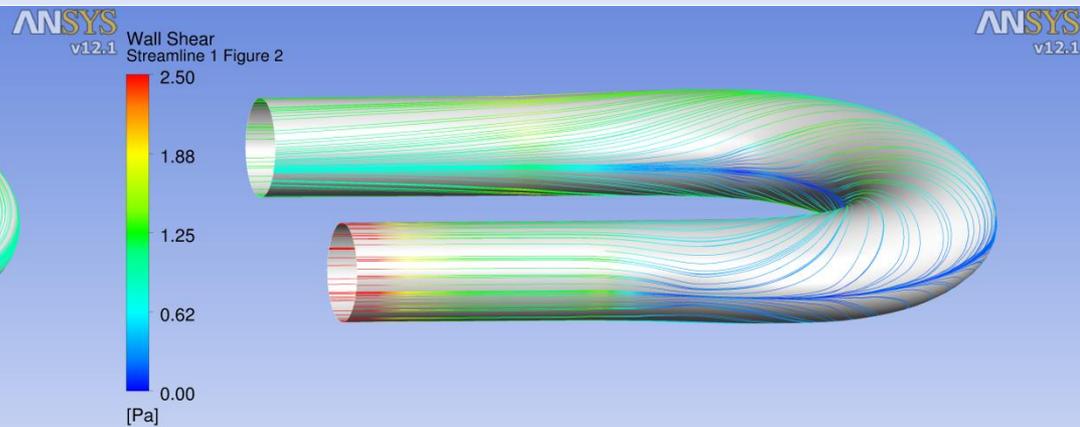
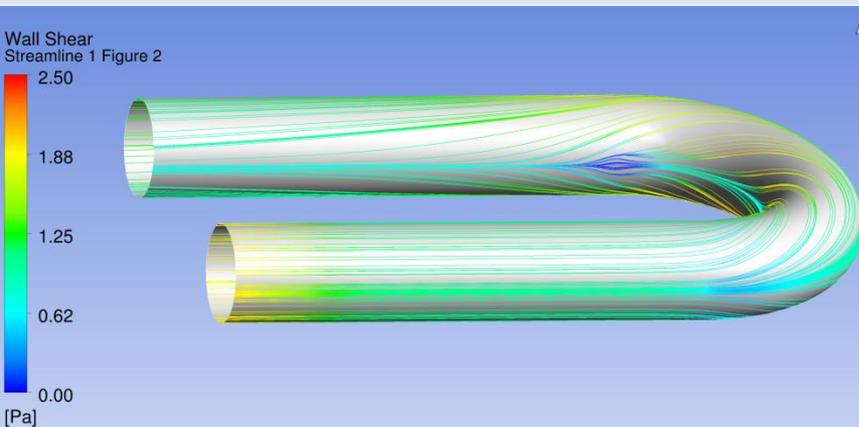
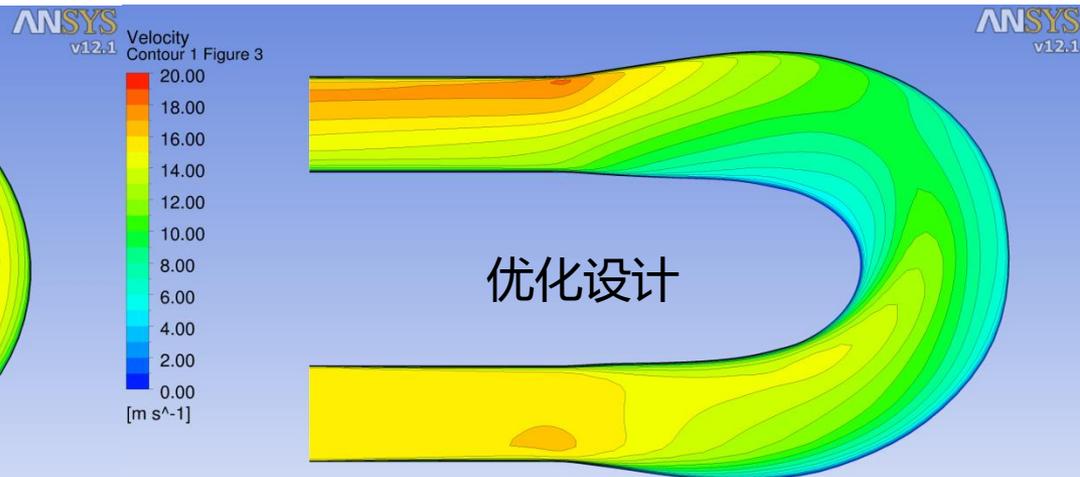
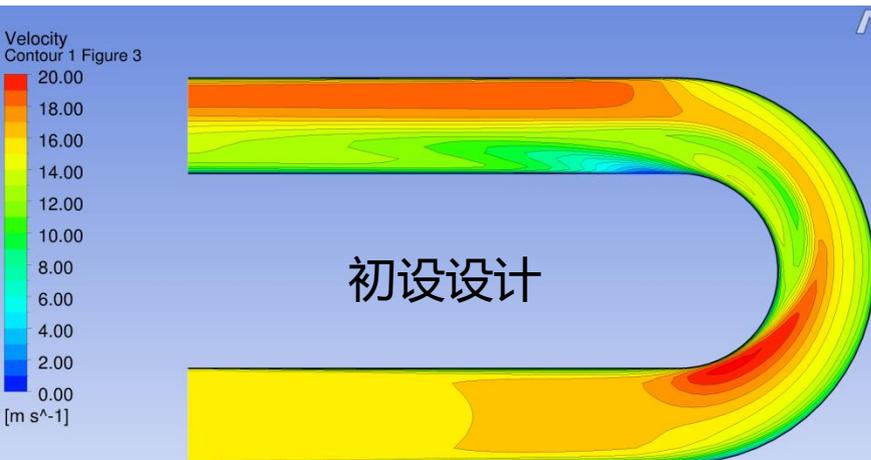
Adjoint Solver案例：U型管减阻设计

- 降低整个U型管的压降 ΔP



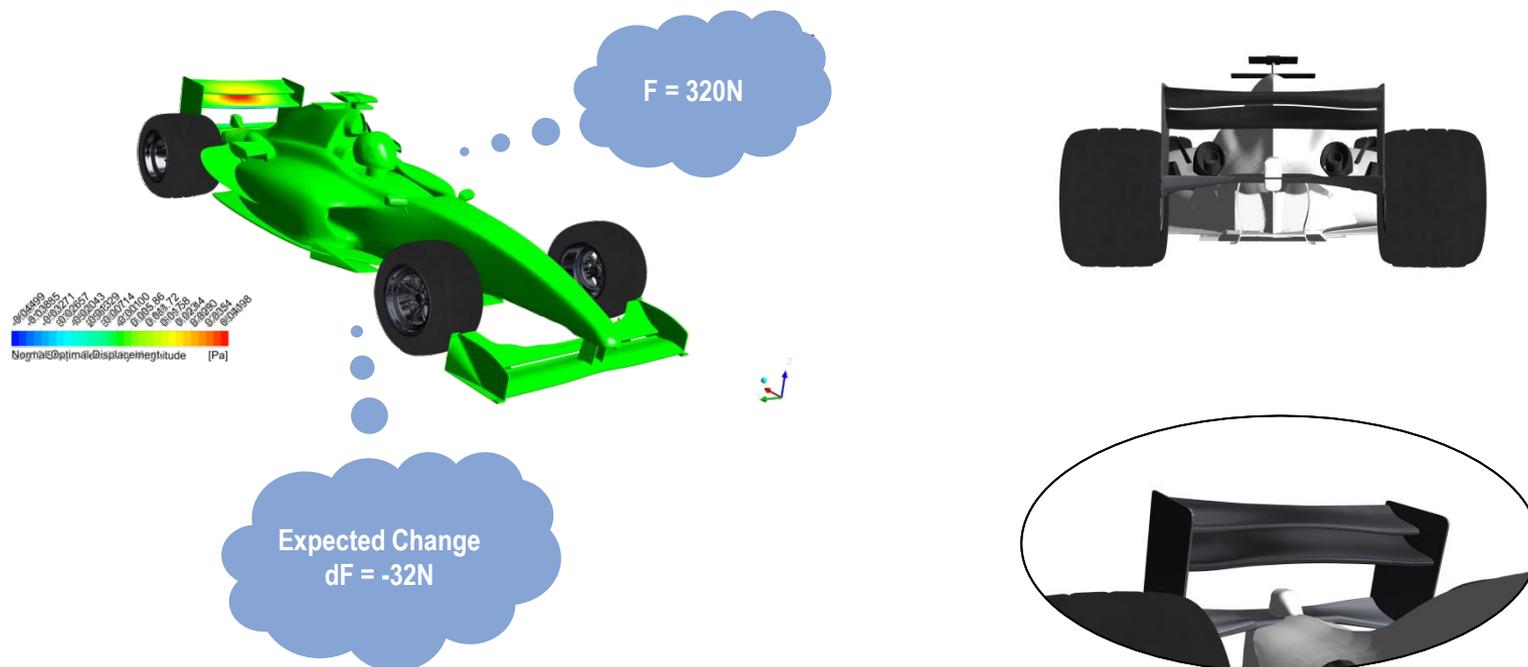
Adjoint Solver案例：U型管减阻设计

- 降低整个U型管的压降 ΔP



Adjoint Solver案例：F1赛车气动减阻设计

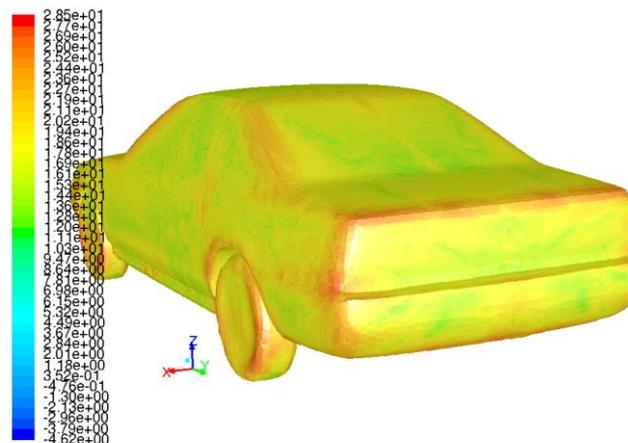
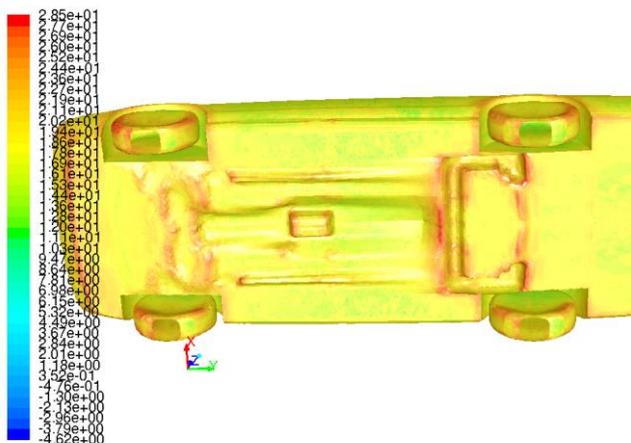
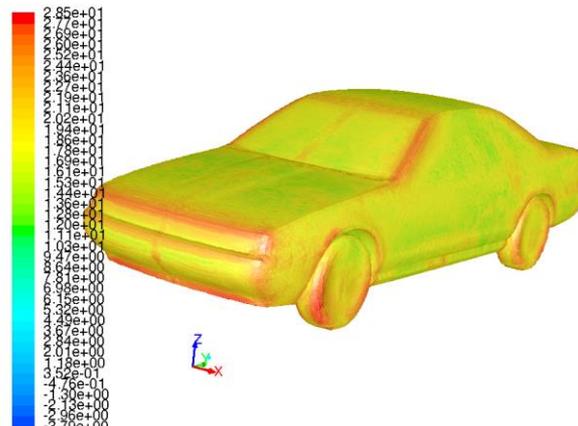
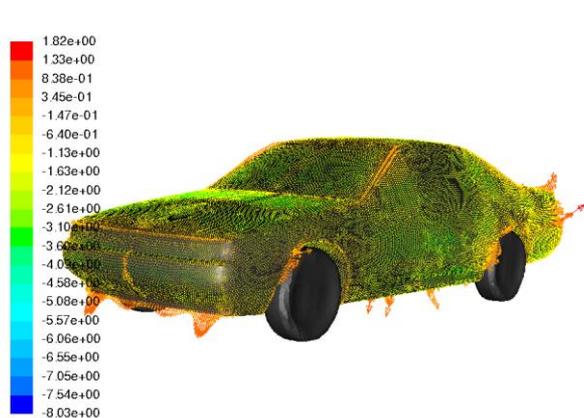
- 通过改动后扰流板的形状，降低整车的气动阻力。



- 整车气动阻力降低了10%

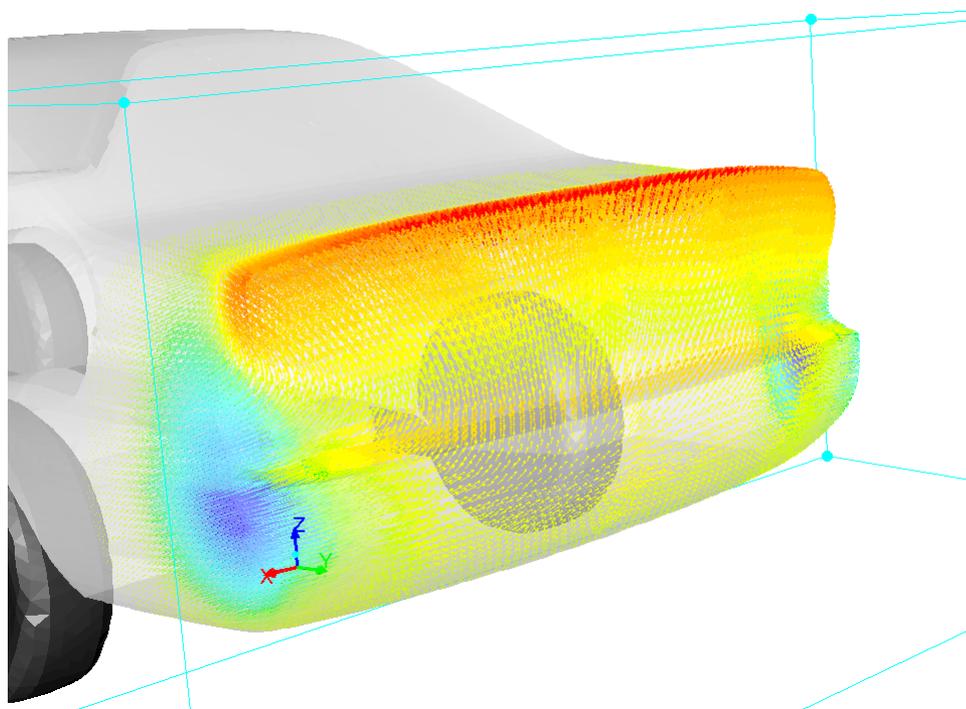
Adjoint Solver案例：轿车气动减阻设计

- 整车气动阻力的形状敏感性计算结果。

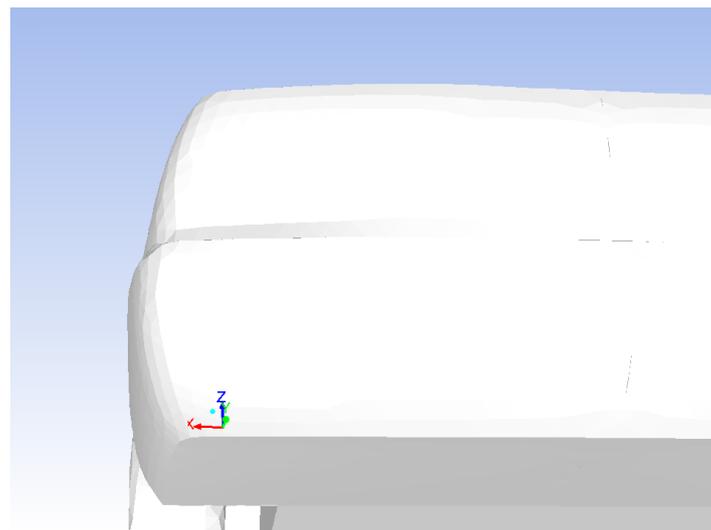
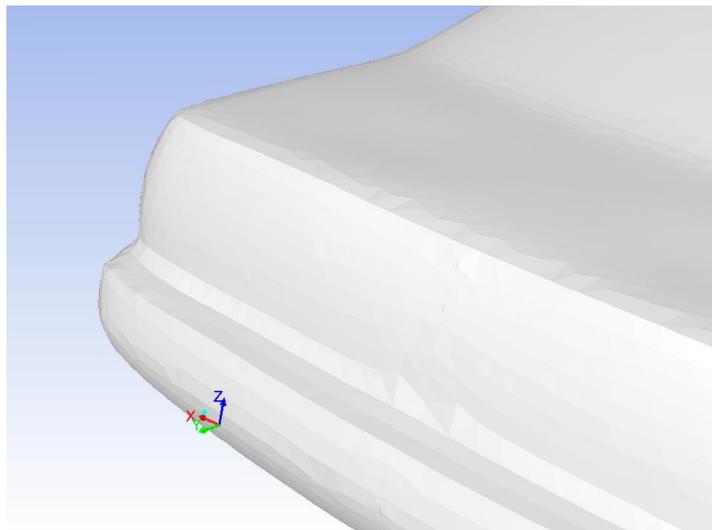
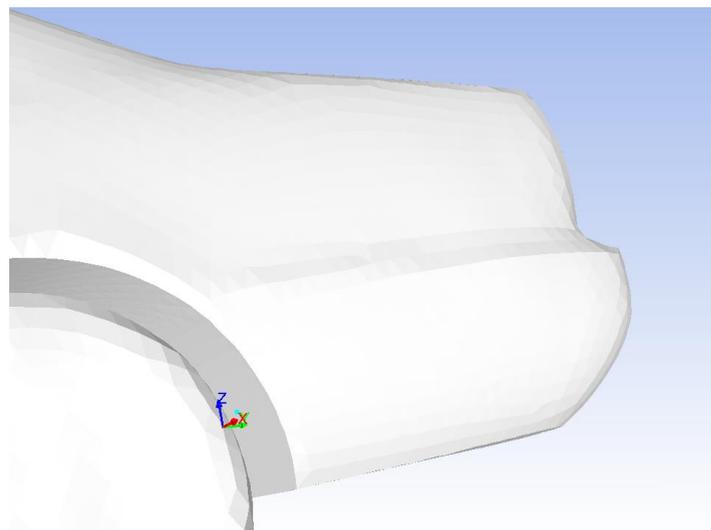
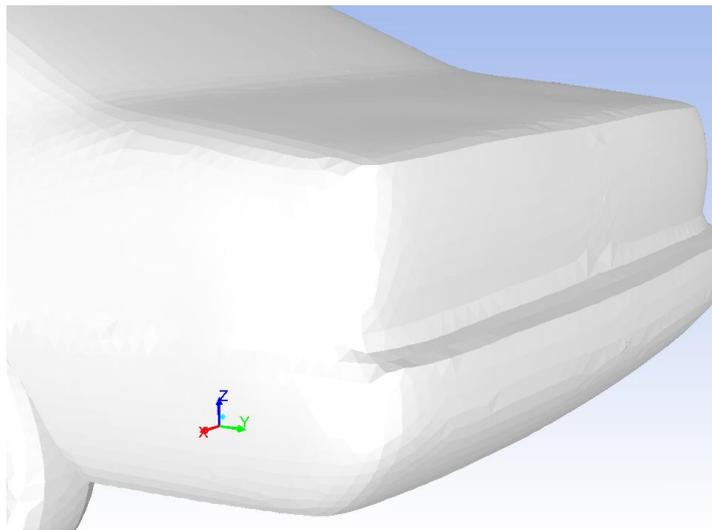


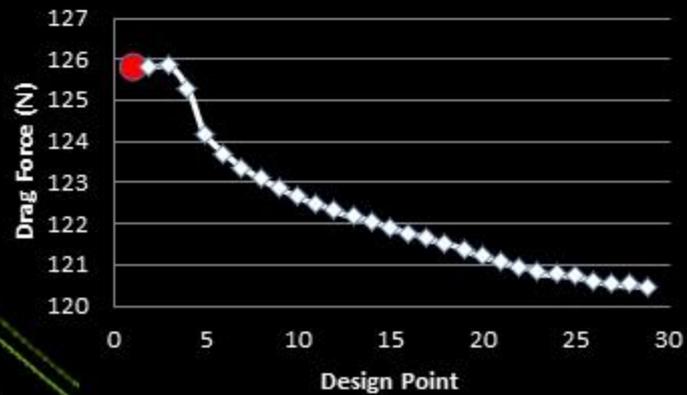
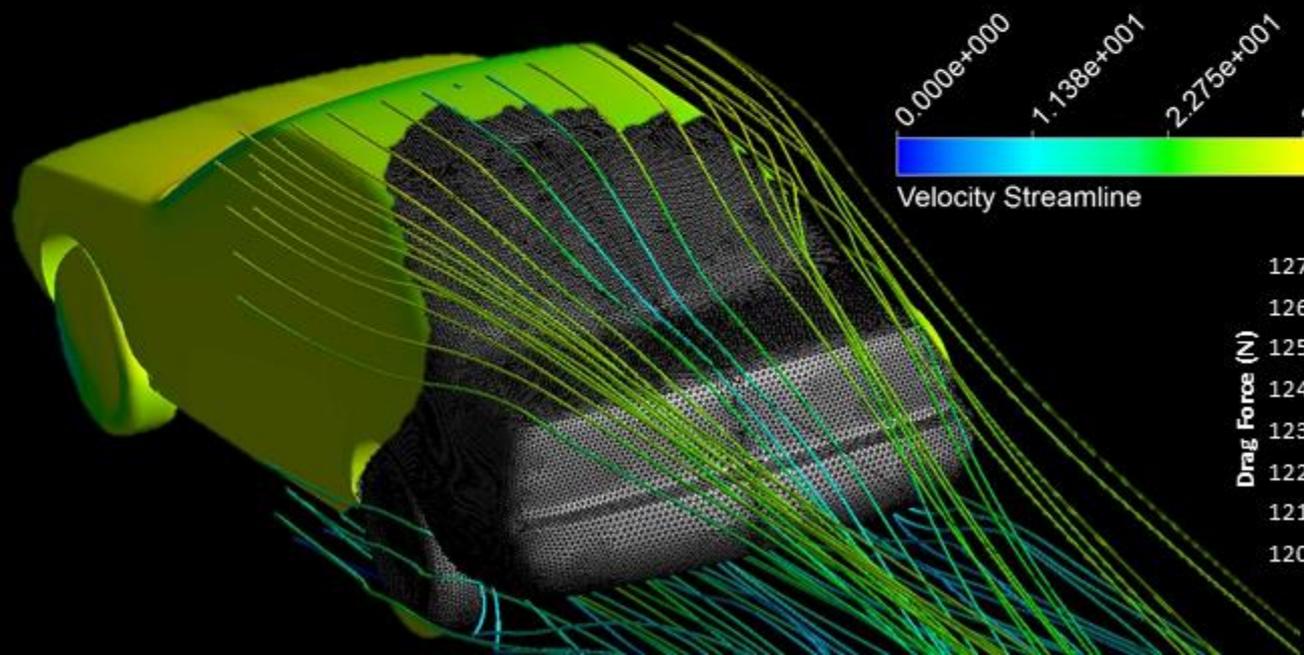
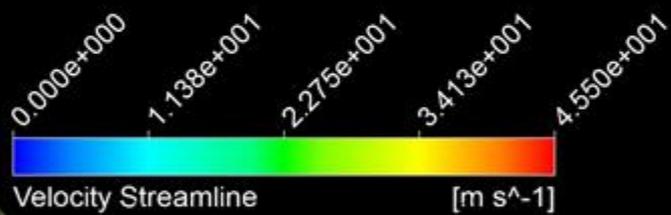
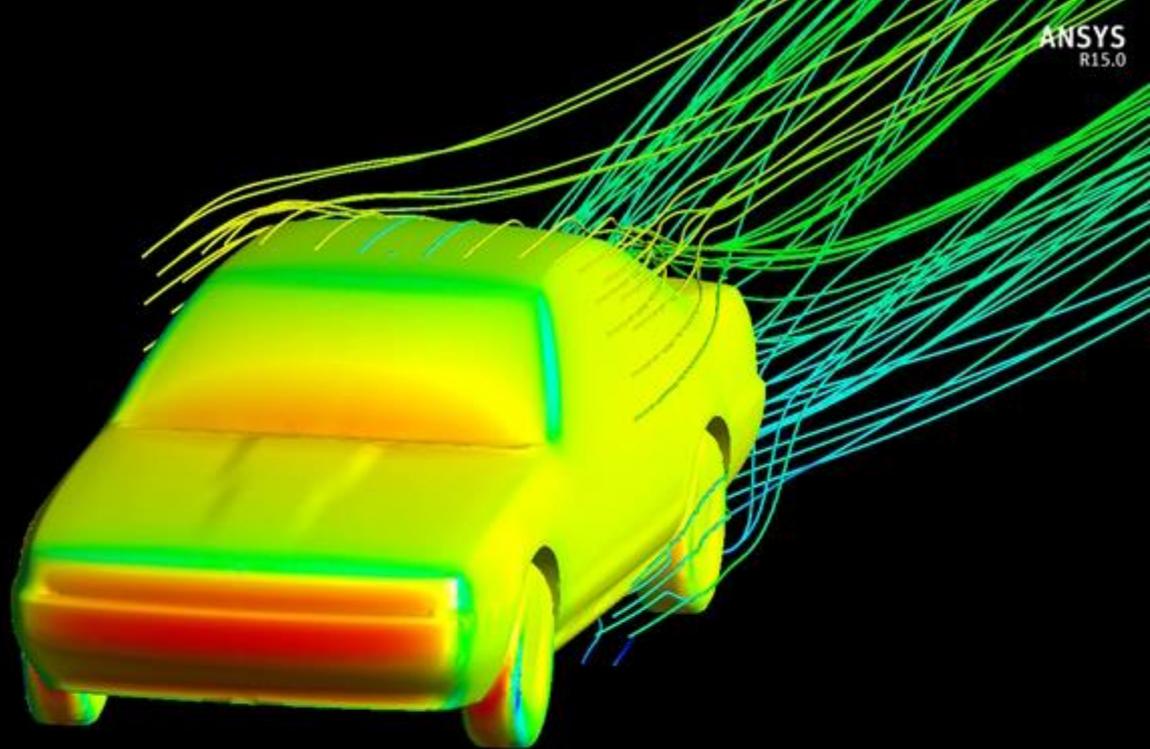
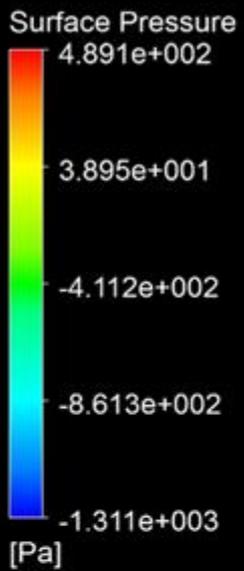
Adjoint Solver案例：轿车气动减阻设计

- 使用控制点定义网格变形区域在车尾处。



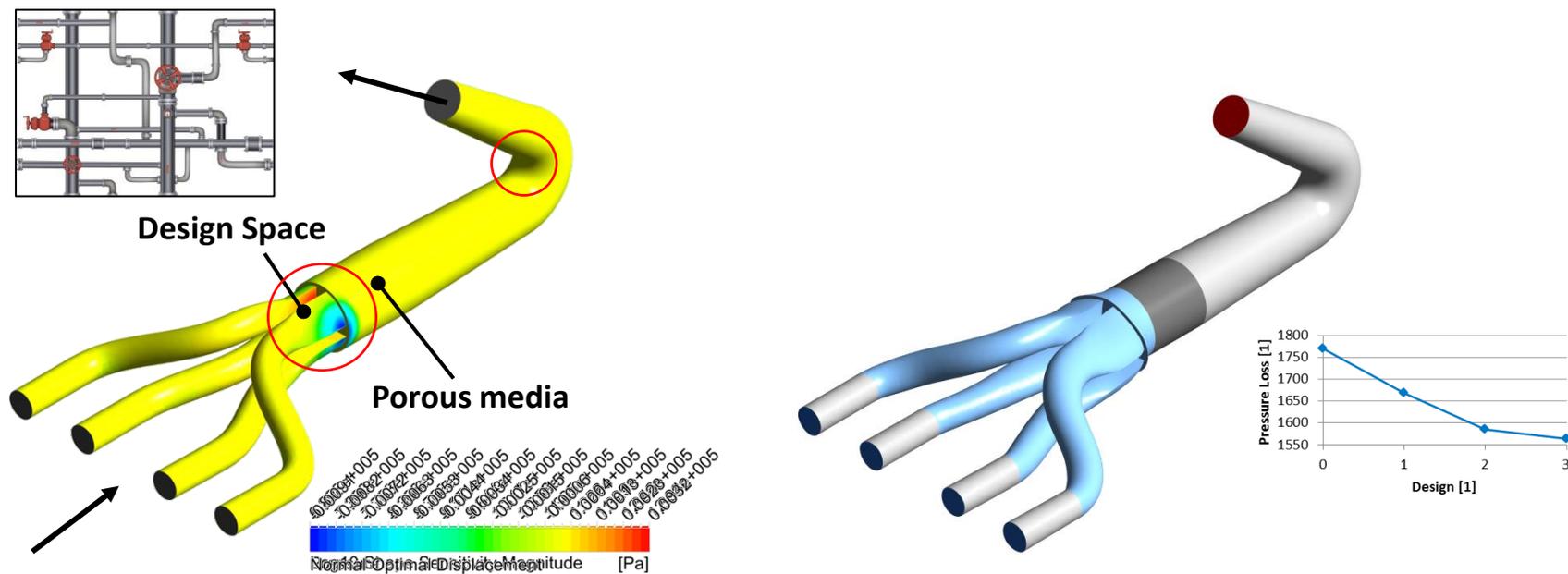
Adjoint Solver案例：轿车气动减阻设计





Adjoint Solver案例：延长管路的设计寿命

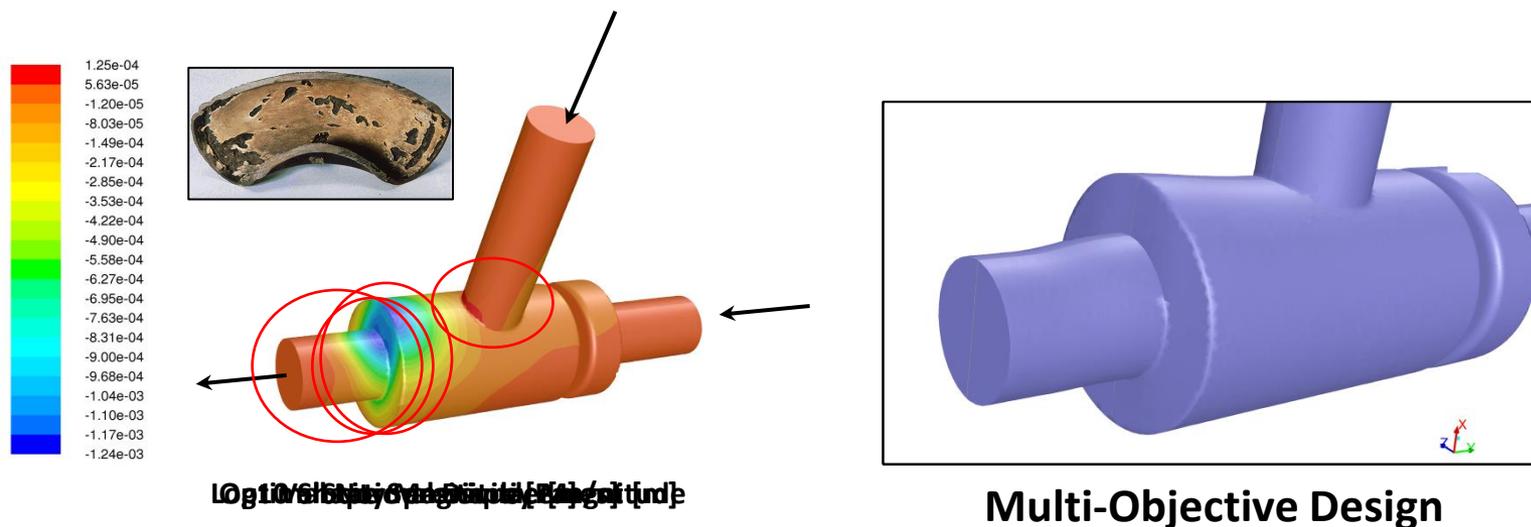
- 通过降低整个管路系统的压降 ΔP ，从而延长管路的设计寿命。



- 优化后的管路压降减少了12%

Adjoint Solver案例：提升管路的设计安全性

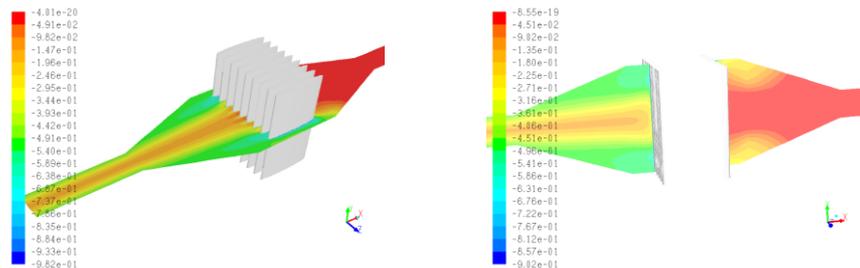
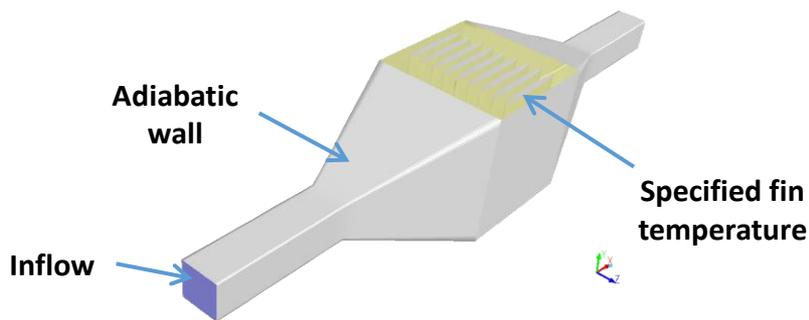
- 阻止局部汽蚀现象的发生，提升管路的设计安全性。
- 降低整个管路系统的压降 ΔP ，提升系统的性能。



- 优化后的管路，易发生汽蚀处的最低静压值增大了18%，整个管路系统的压降减少了24%

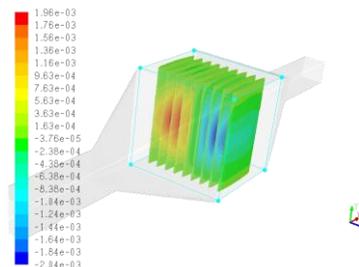
Adjoint Solver案例：增大散热片的换热能力

- 通过改变散热片的形状，增大其换热能力。

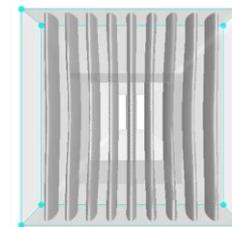


Sensitivity to thermal sources

- 初始设计的换热量：2788 W
- 优化后的换热量：3067 W



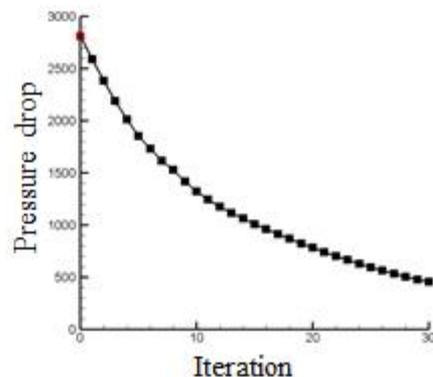
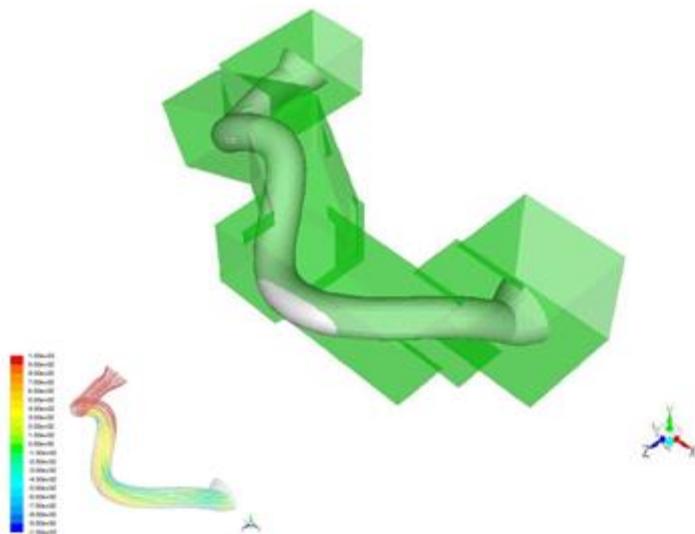
Shape sensitivity



Optimized fins

Adjoint Solver案例：条件限制的管路减阻设计

- 使用Adjoint Solver进行形状优化，有时需要考虑管路周围的狭窄几何空间限制条件，以避免管路和周围的其它部件发生位置干涉。
- 可以从外部导入cas、msh、stl等格式的定界表面，作为网格变形时的几何空间限制条件。



ANSYS®



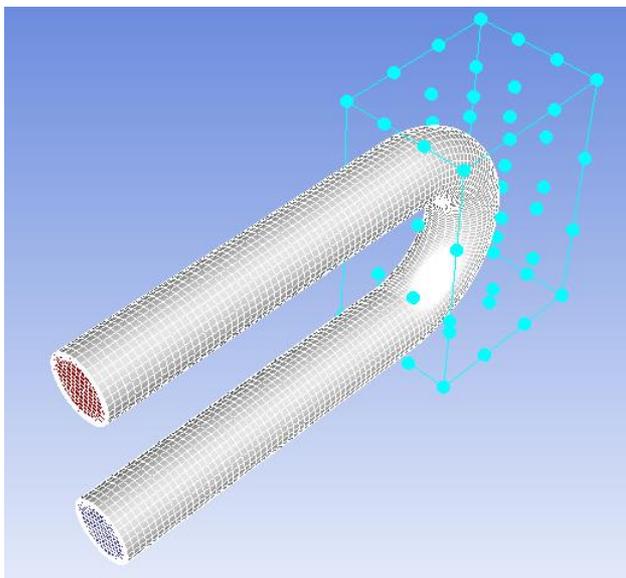
ANSYS
ONVERGENCE
CONFERENCES

2016 | ANSYS中国技术大会
中国·上海

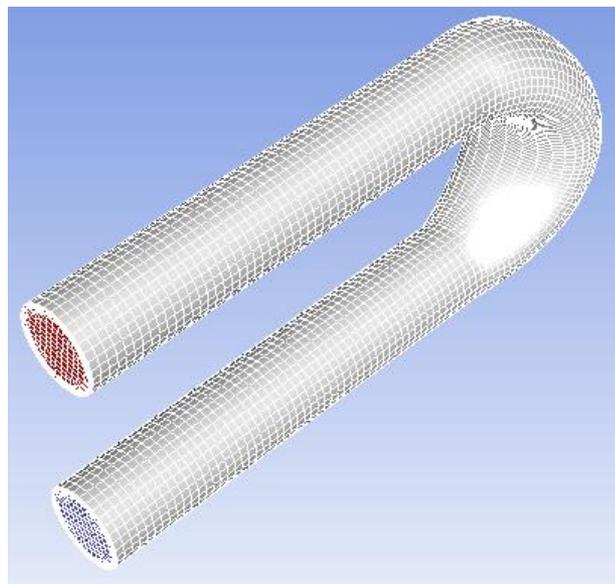
Mesh Morpher Optimiser (MMO)

Mesh Morpher Optimiser (MMO)

- **FLUENT Mesh Morpher**基于预定义的控制点运动，使网格进行平滑光顺的变形。
 - 变形方式需要预先定义
 - 网格变形由控制点的位移带动
 - 变形是平滑光顺的
 - 控制盒限制变形



网格变形前

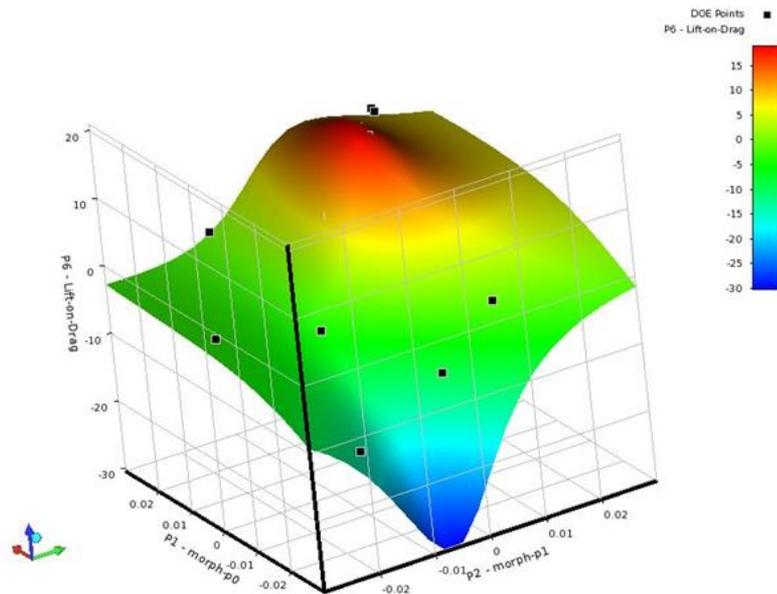


网格变形后

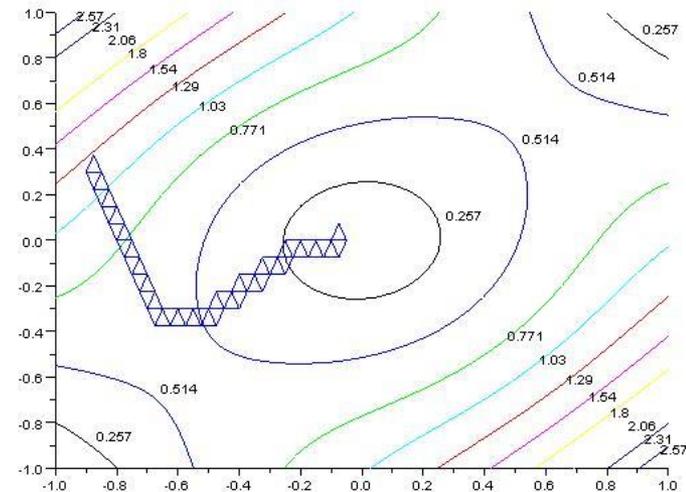
MMO优化方法

- MMO可以和2种优化方法进行耦合
 - 使用Design Xplorer (DX)中的试验设计(DOE)进行优化
 - 使用FLUENT Mesh Morpher Optimiser (MMO)内置的一种优化工具进行优化，例如Simplex、NEWUOA等优化器

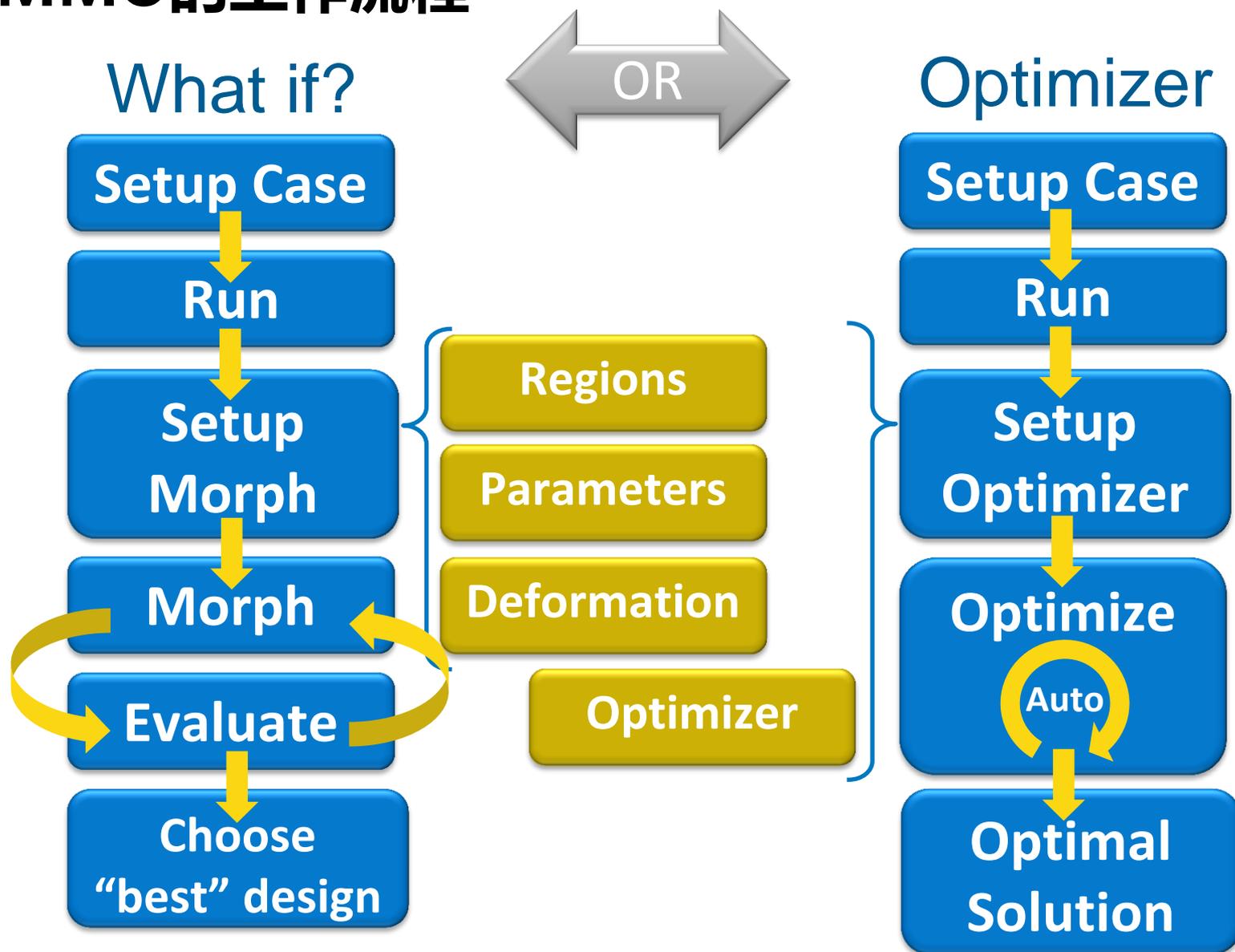
Design Xplorer – 试验设计



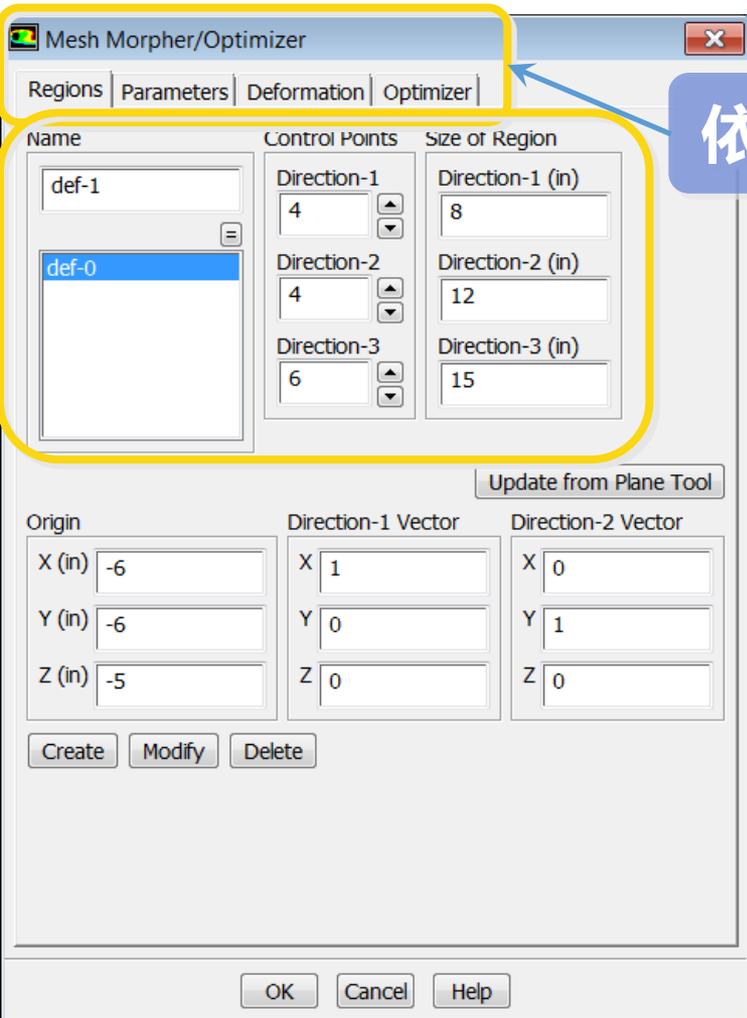
FLUENT内置的优化工具



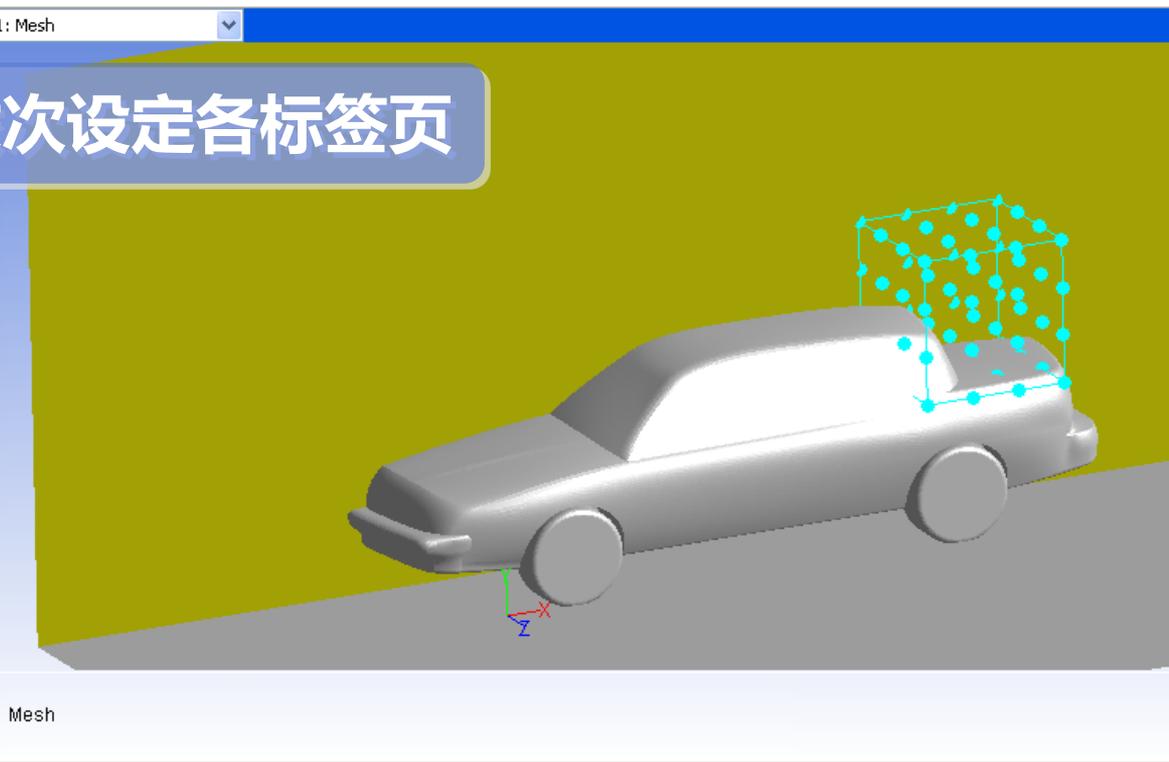
MMO的工作流程



MMO案例：轿车气动减阻设计

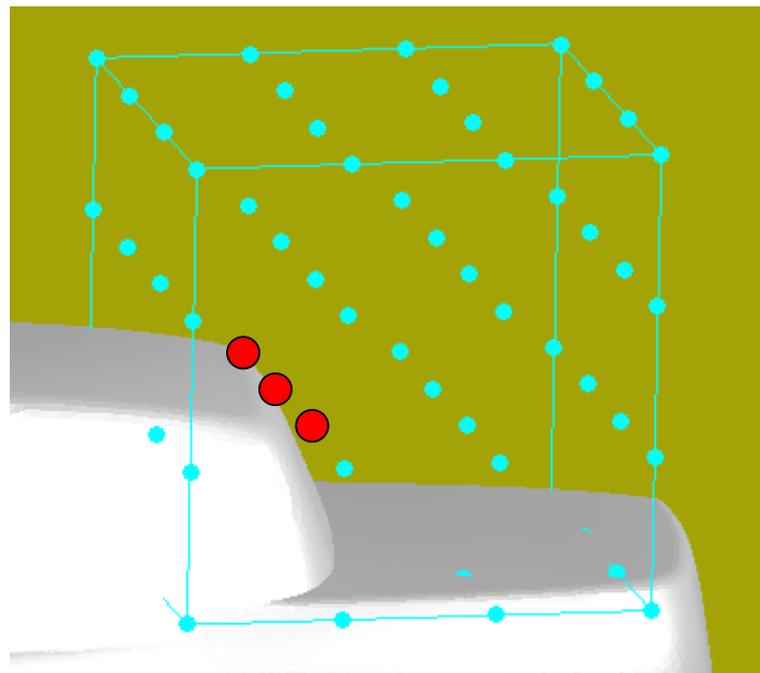
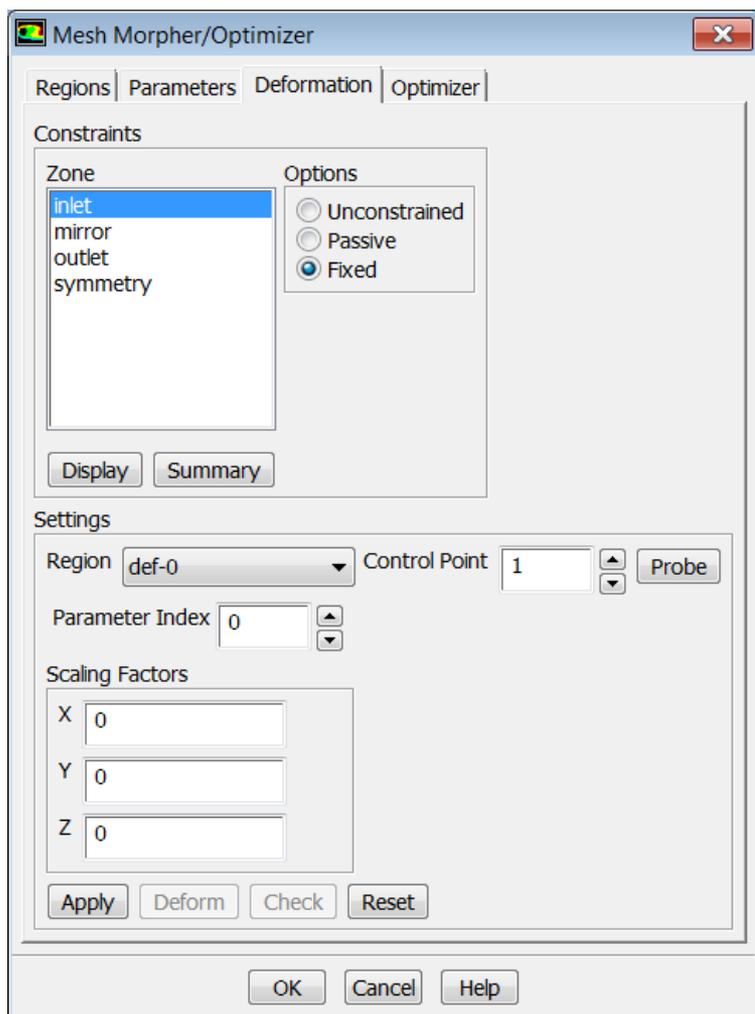


依次设定各标签页



定义控制区域

MMO案例：轿车气动减阻设计

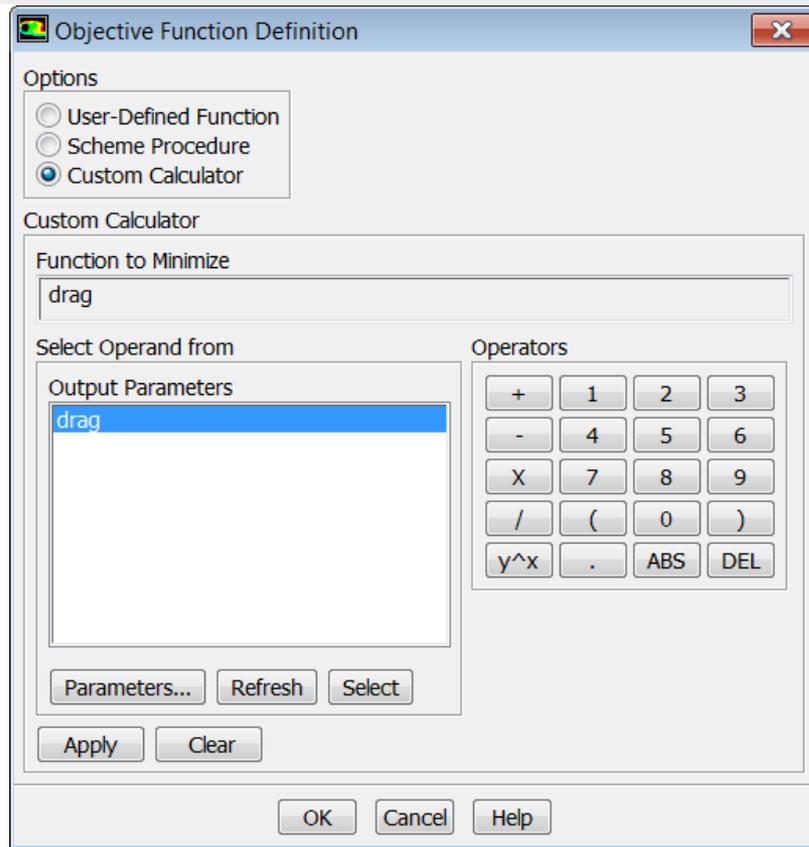
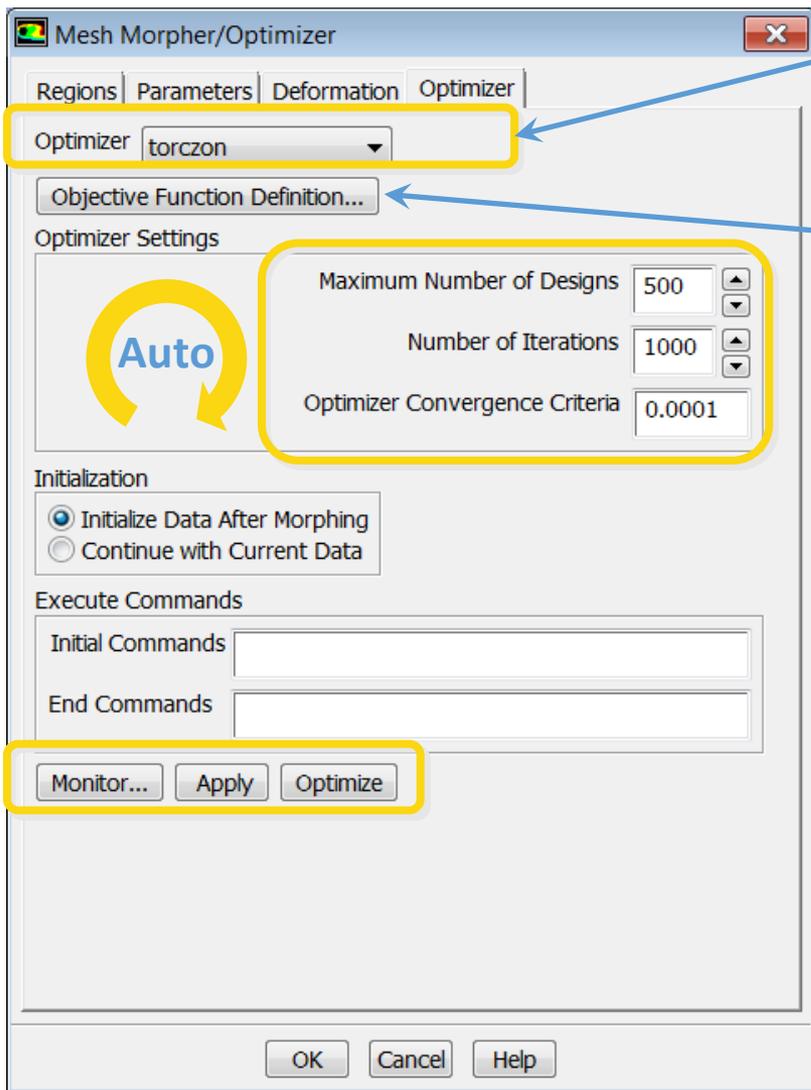


定义约束条件（如果需要的话）

选择控制点，指定运动的相对范围

MMO案例：轿车气动减阻设计

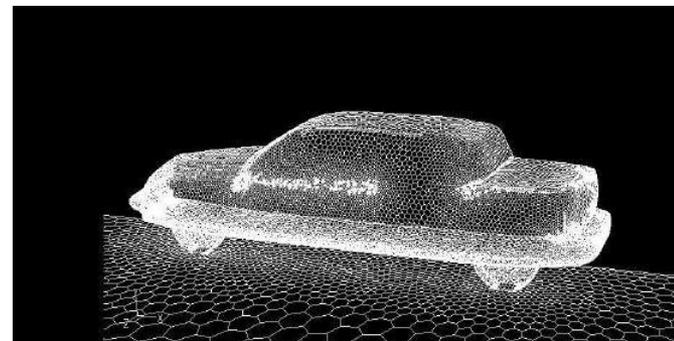
优化器：Compass, Powell, Simplex, Rosenbrock, Torczon, NEWUOA



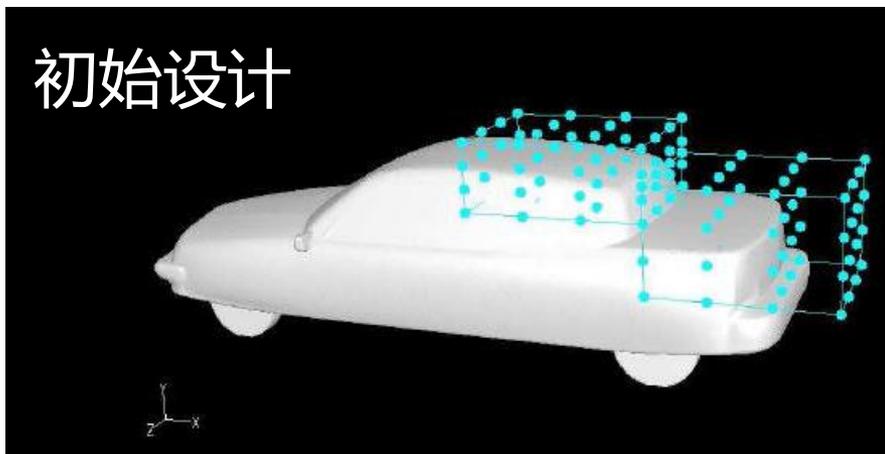
优化！

MMO案例：轿车气动减阻设计

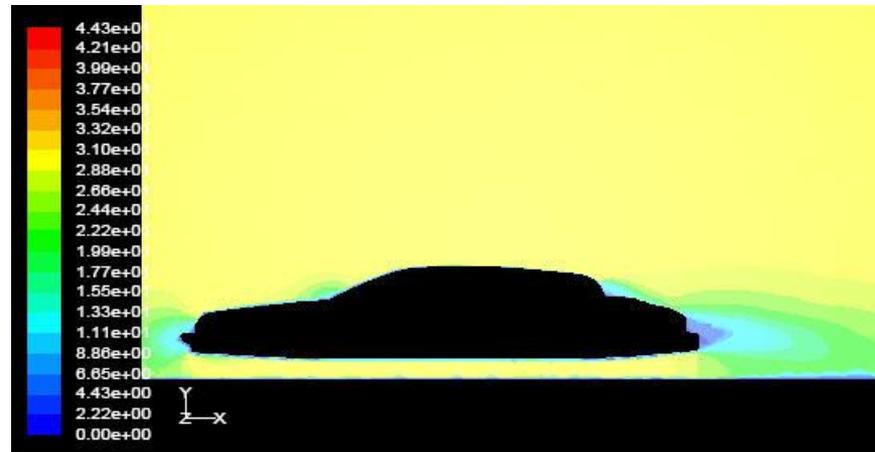
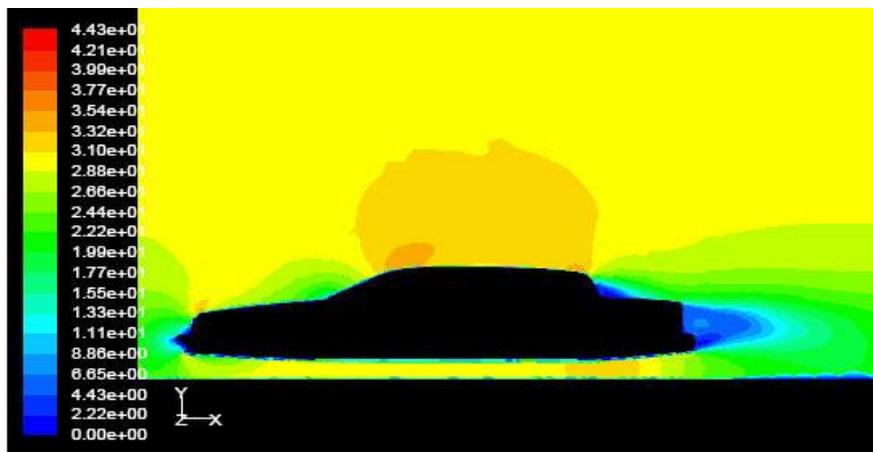
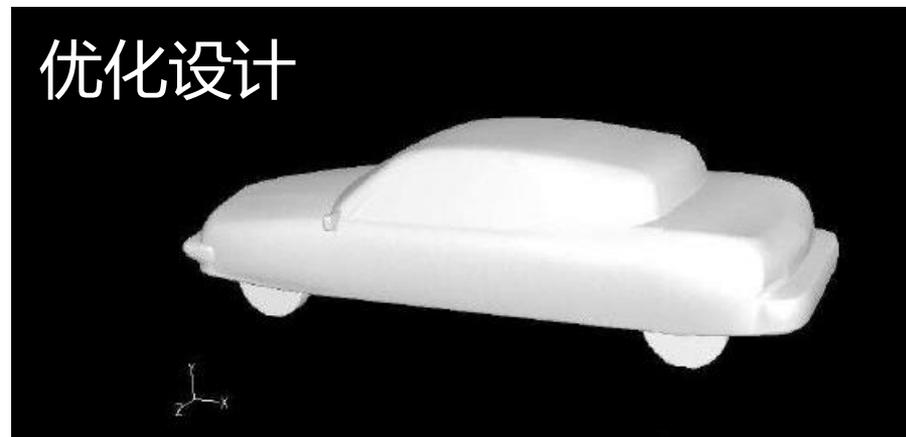
- 优化结果



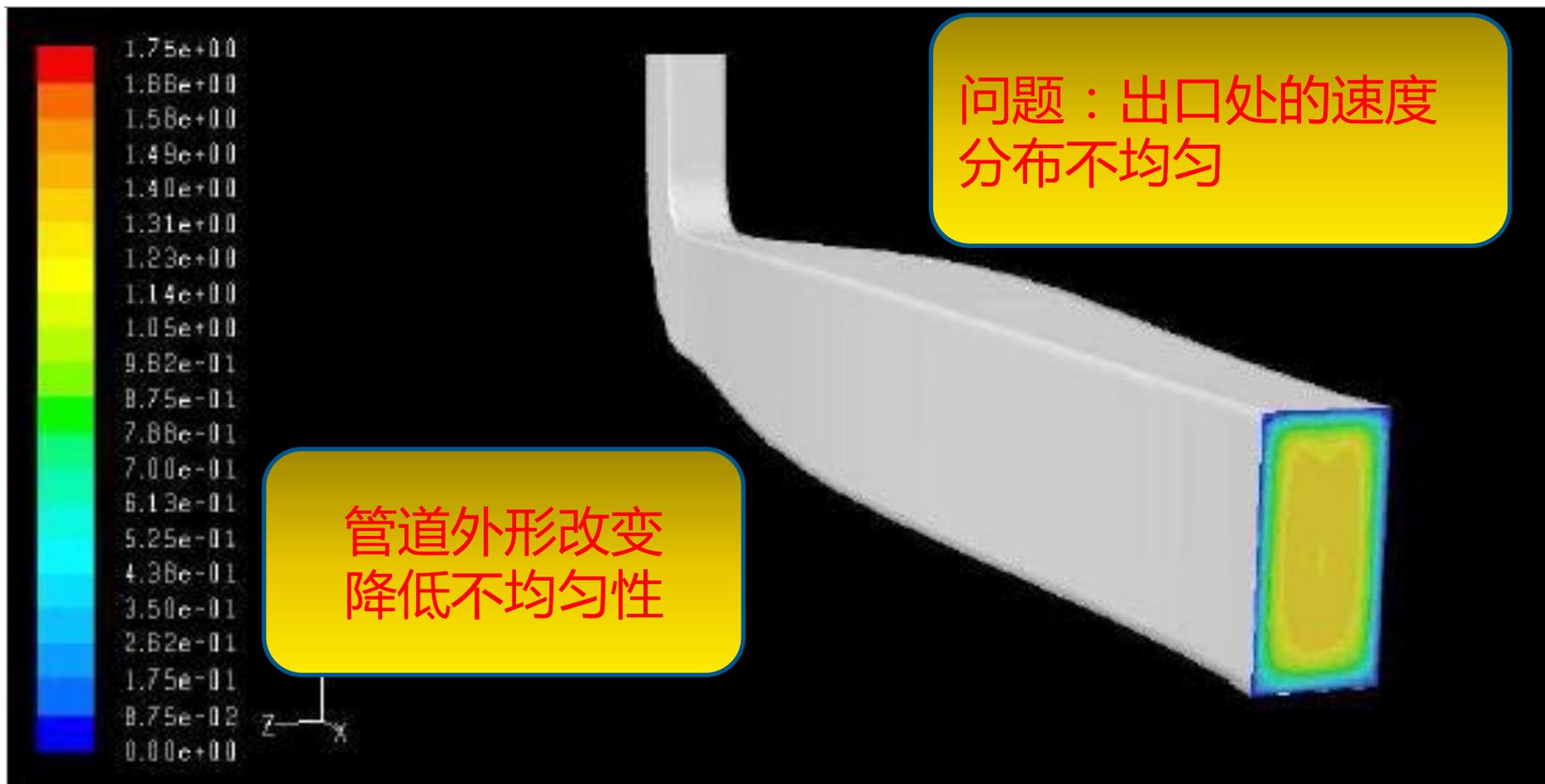
初始设计



优化设计

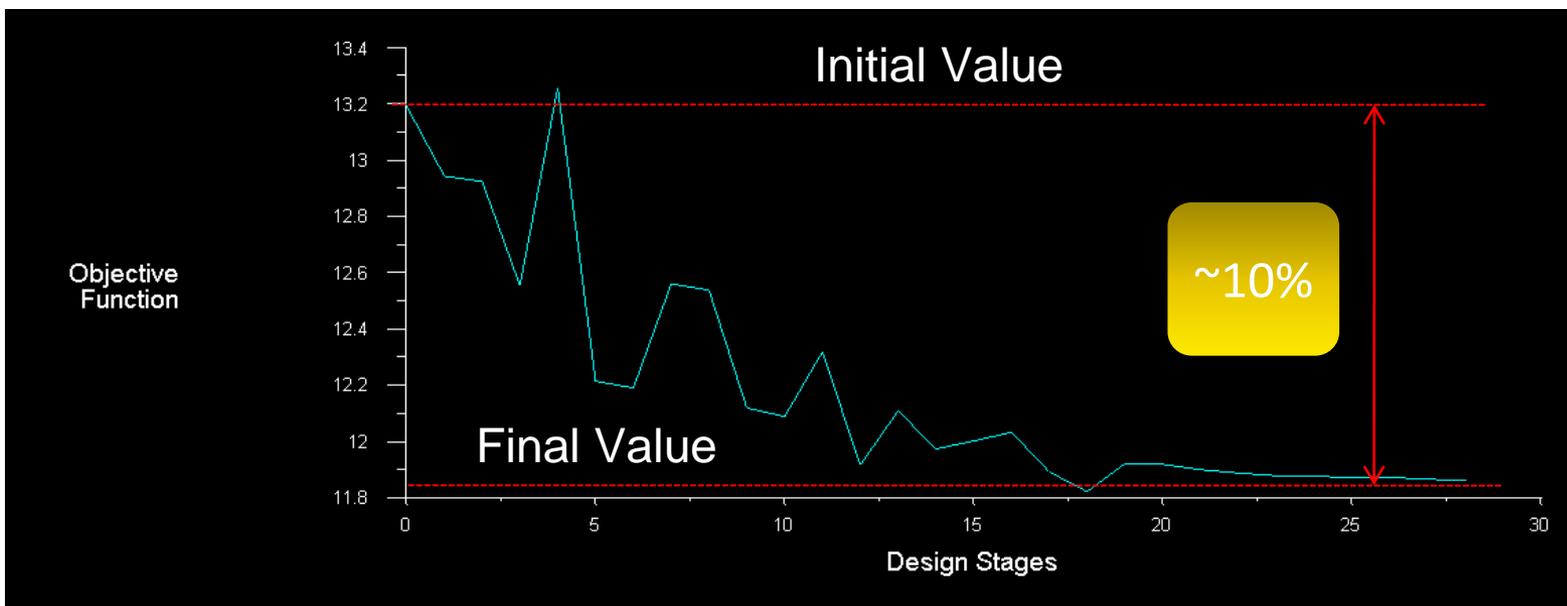


MMO案例：L形管路提升出口流动均匀性设计



流动均匀性显著改善

MMO案例：后视镜气动减阻设计



ANSYS®



ANSYS
ONVERGENCE
CONFERENCES

2016

ANSYS中国技术大会
中国·上海

NACA0012翼型优化案例操作演示

ANSYS®



ANSYS
ONVERGENCE
CONFERENCES

2016 | ANSYS中国技术大会
中国·上海

感谢聆听