

面向汽车行业 CAE&CFD 解决方案 全国巡回研讨会

上海
6.8

重庆
6.10

武汉
6.12

北京
6.16

长春
6.18



基于ANSYS Fluent的汽车外流/优化分析 解决方案 ~空气动力学最佳实践及优化~

2015.06

IDAJ-China 技术部
祝彦寿 唐连伟



IDAJ-CHINA



IDAJ艾迪捷

目录

- 空气动力学重要性
- 基于Fluent的最佳实践
- 优化方案
 - 1.Adjoint Solver优化方案
 - 2.Fluent与modeFRONTIER的耦合优化方案
- 总结

目录

- 空气动力学重要性
- 基于Fluent的最佳实践
- 优化方案
 - 1.Adjoint Solver优化方案
 - 2.Fluent与modeFRONTIER的耦合优化方案
- 总结

空气动力学重要性

■ 空气动力学特性

- 汽车在空气流动中受到阻力，升力，侧向力及相应力矩产生的车身外部流动特性。
- 气动噪音特性
- 发动机风冷特性

■ 空气动力学特性对燃油经济性的影响

阻力消耗的功率：
$$P = \frac{C_D \rho A u^3}{2\eta_T}$$

■ 空气动力学特性对操作稳定性影响

随着车速增大，升力和升力矩也会增大，汽车的附着力会减小，降低汽车稳定性

■ 空气动力学特性对外造型初步方案的影响

气动造型和美学造型的结合

急需高精度空气动力学方案/软件

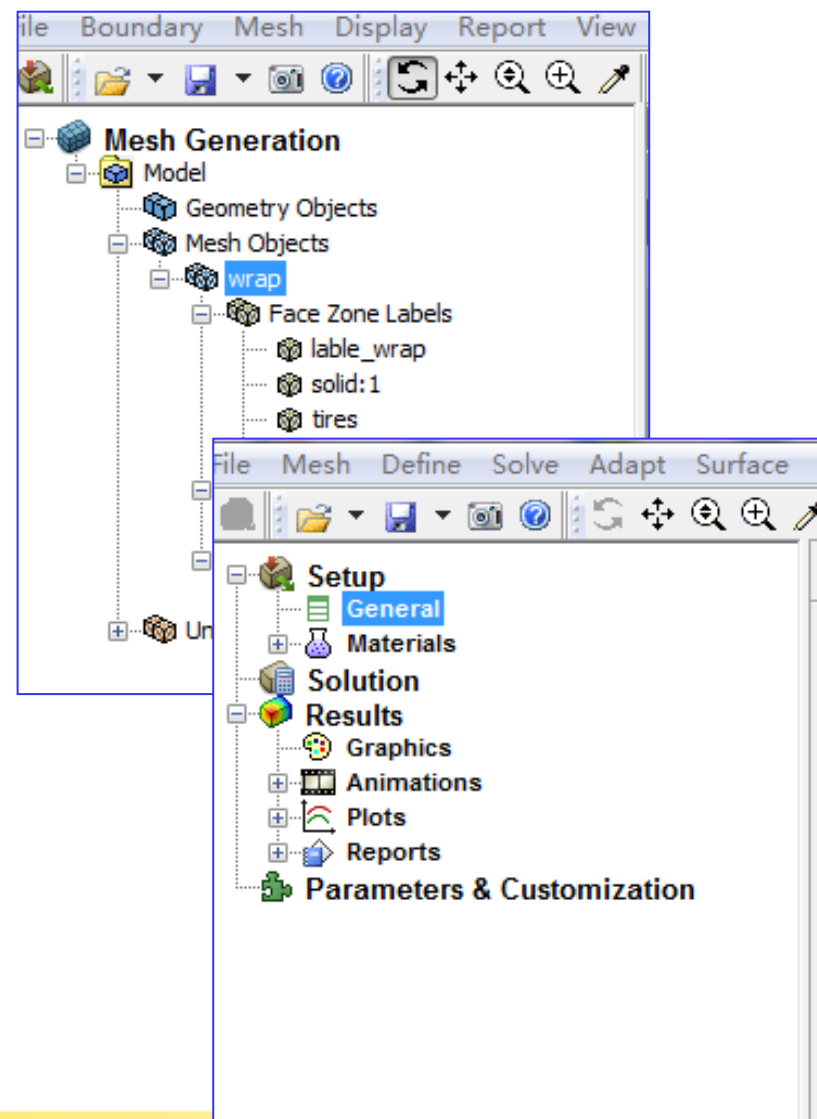
目录

- 空气动力学重要性
- 基于Fluent的最佳实践
- 优化方案
 - 1.Adjoint Solver优化方案
 - 2.Fluent与modeFRONTIER的耦合优化方案
- 总结

基于Fluent的最佳实践

■ Fluent新版本R16.0的改进

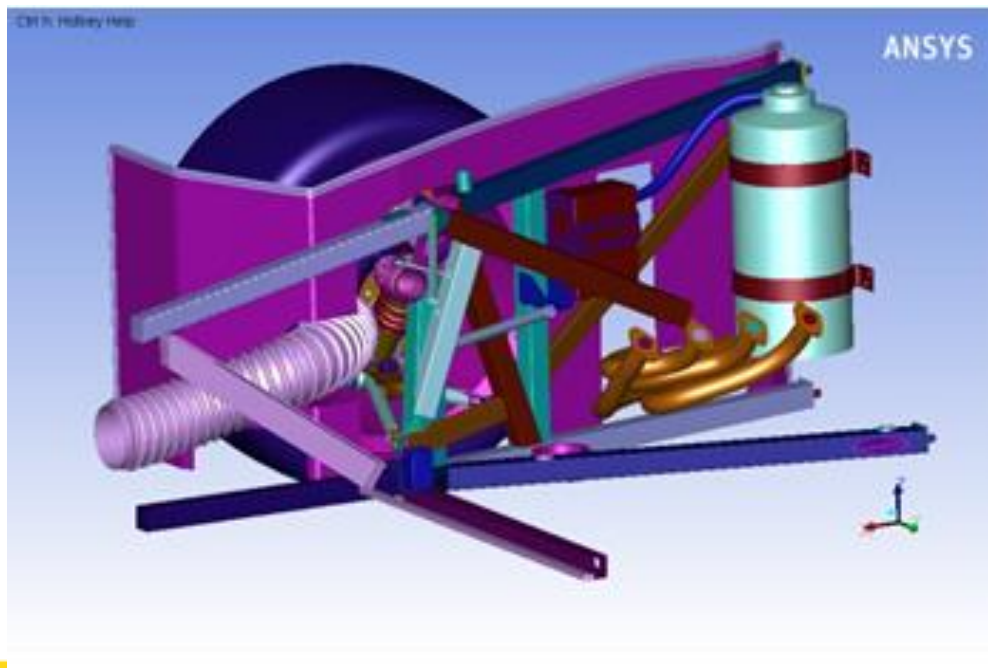
- 为Fluent和Fluent Meshing提供新型用户界面，让用户能够更好地管理流程仿真设置。
- 增强几何结构获取和模型准备功能，CAD导入速度更快，并提供大量“包面”功能改进。表面间隙自动闭合让模型能够直接用于CFD仿真，这样最省时省力。



基于Fluent的最佳实践

■ Fluent新版本R16.0的前处理环境

- ANSYS Fluent网格功能可以快速划分复杂或不完整几何结构所需要的关键技术：CAD导入、孔和间隙修补、高质量表面网格创建以及快速体积网格创建。Fluent网格划分具有众多优势：



- ① 多功能性
- ② 易用性
- ③ 内置智能功能
- ④ 准确性
- ⑤ 快速

基于Fluent的最佳实践

■ 空气动力学仿真最佳实践

- 网格策略
- 壁面函数策略
- 湍流模型策略
- 多种差分格式
- 多种求解格式

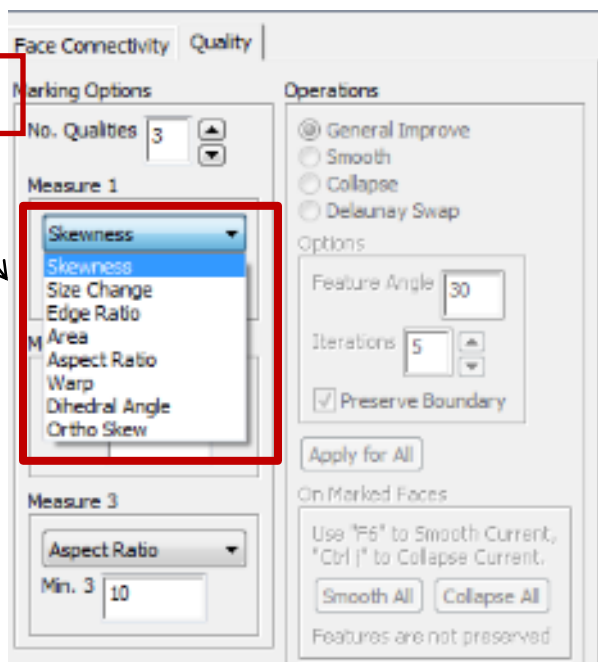
高精度CFD软件

基于Fluent的最佳实践

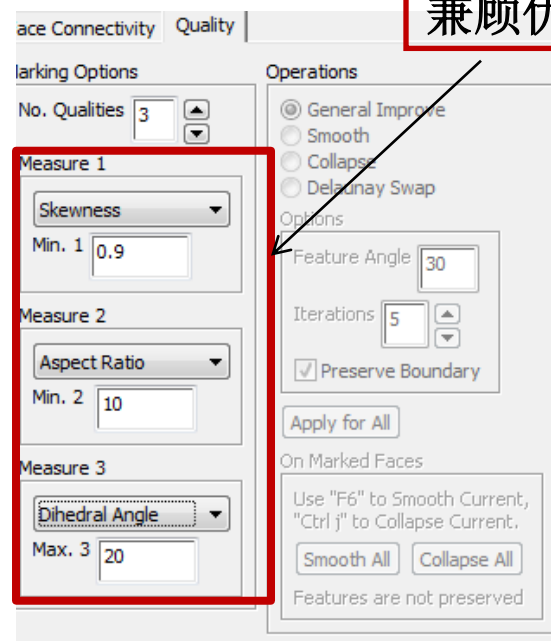
■ 面网格优化策略

- 在Fluent meshing中有多种面网格优化方法。
- 多种优化方法并行优化，其他CFD软件不具备这样的功能。
- 根据网格所要求，可以用多种组合方式优化网格。

优化方法



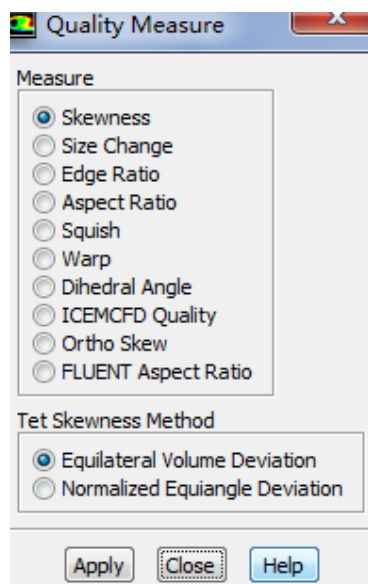
兼顾优化



建议：对于空气动力学计算建模，建议skewness≤0.7

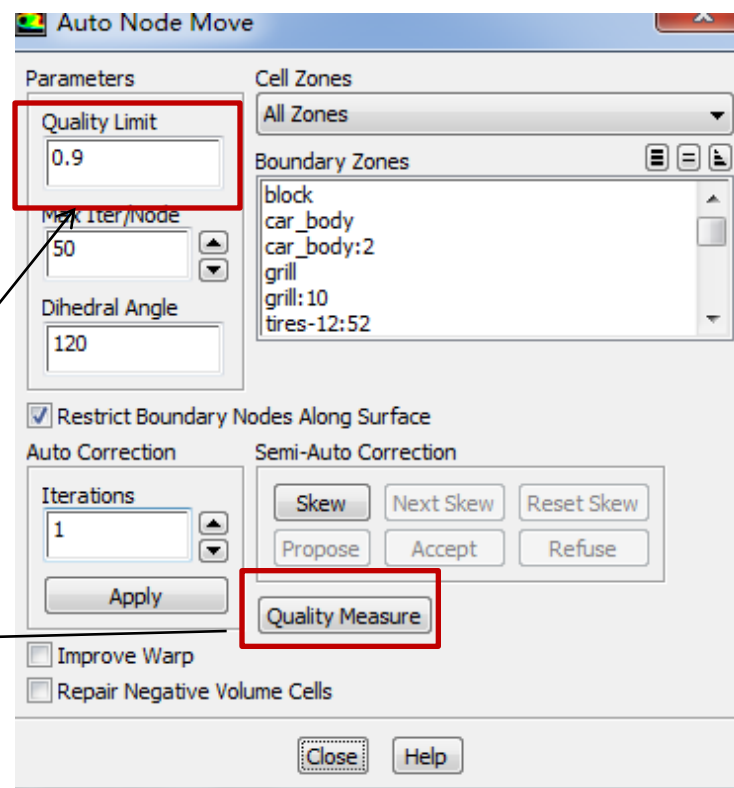
基于Fluent的最佳实践

- 体网格优化策略
 - 控制体网格质量
 - 提供节点移动工具



质量控制

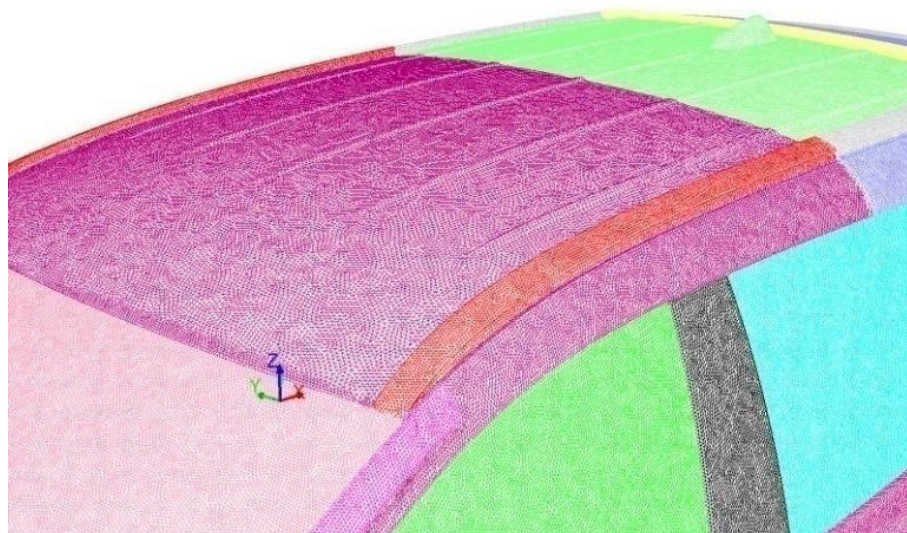
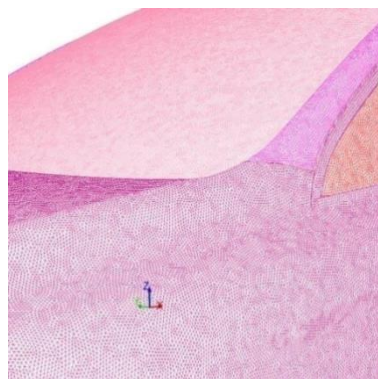
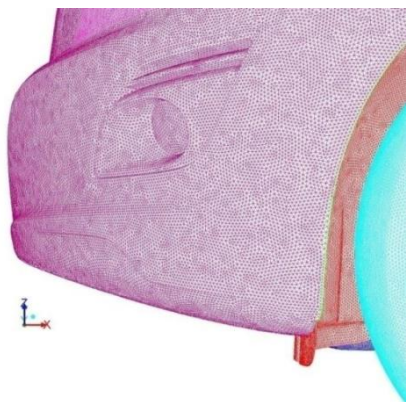
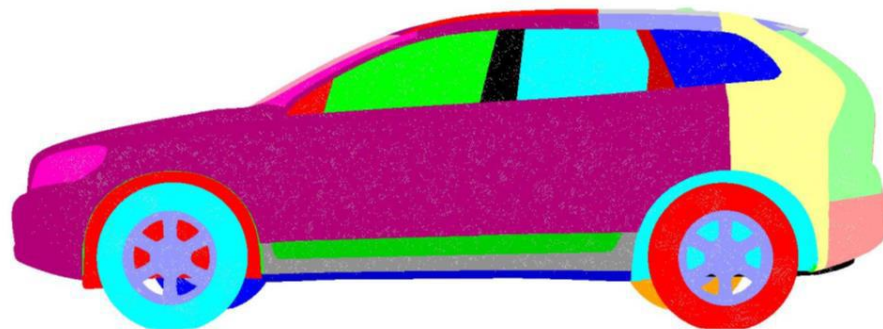
默认的是
skewness



基于Fluent的最佳实践

■ 体网格尺寸建议(壁面处)

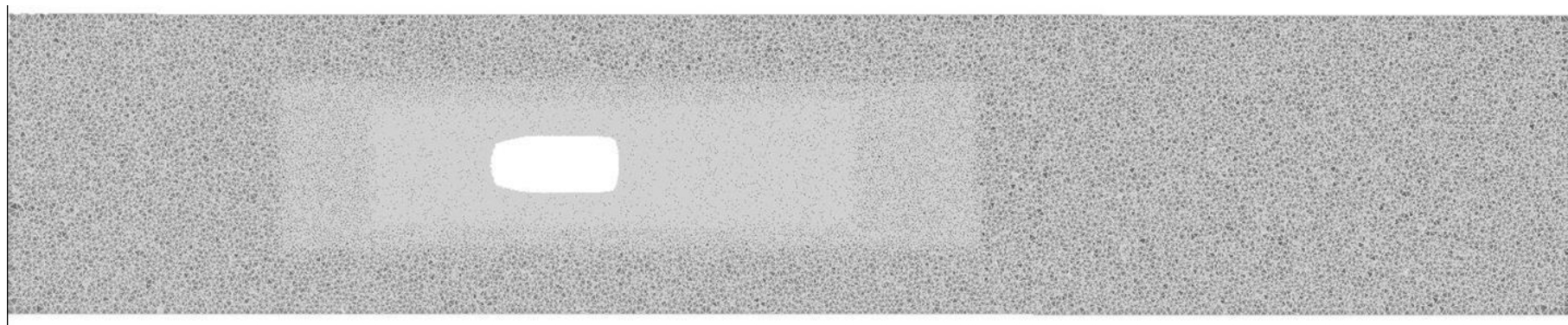
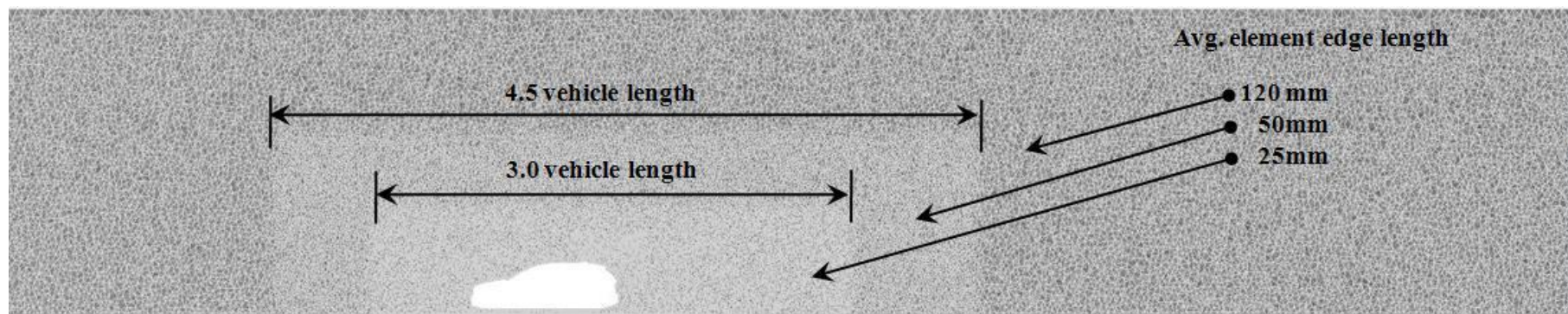
- 车头: 3.0 to 4.0 mm,
 - 风挡: 4.0 to 5.0 mm
 - 车门/车窗 : 5.0 to 6.0 mm
 - 车顶: 6.0 to 8.0 mm
 - 车尾: 4.0 to 5.0 mm
 - 底盘: 5.0 to 6.0 mm
- ✓ 升力计算时按需要调整减少



基于Fluent的最佳实践

■ 体网格尺寸建议(尾流区域)

- 采用体积加密对车体局部进行逐级加密;
- 尾流区域一般建议2-5倍车长, 网格尺寸~25mm。



基于Fluent的最佳实践

■ 壁面函数策略

➤ 标准壁面函数

- ✓ 适用于高雷诺数， Y_{plus} 不能太小，一般下限为15，低于此值结果精度会降低。

➤ 非平衡壁面函数

- ✓ 考虑了压力梯度效应，因此对于涉及到分离、再附着、及撞击等平均速度与压力梯度相关且变化迅速的复杂流动问题，推荐使用些壁面函数。不适合低雷诺数流动。

➤ 可缩放比例壁面函数

- ✓ 可缩放比例壁面函数的目的在于联合使用标准壁面方法以强迫使用对数律。该功能是通过使用限制器 $y^* = \max(y^*, y^*_{limit})$ 来实现的，其中 $y^*_{limit} = 11.06$ 。

➤ 加强壁面函数

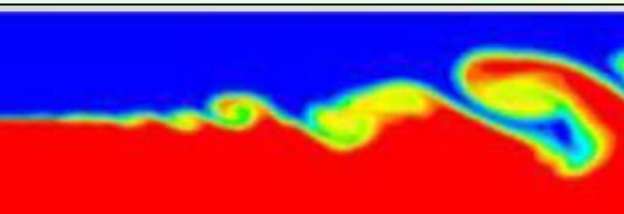
- ✓ 近壁面区域采用混合双层模型，区域分为粘性底层和湍流核心区。
- ✓ 不依赖于壁面法则，对于复杂流动尤其是低雷诺数流动问题很适合。该方法要求近壁面网格很密， y^+ 接近于1。如缝隙流动，高粘度低速流动等。

基于Fluent的最佳实践

■ 湍流模型策略

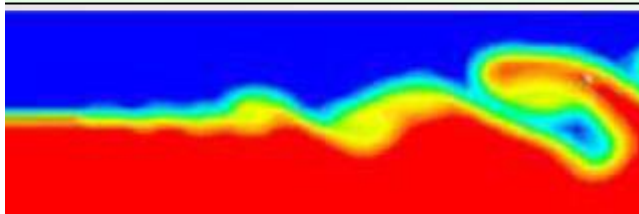
DNS

(Direct Numerical Simulation)



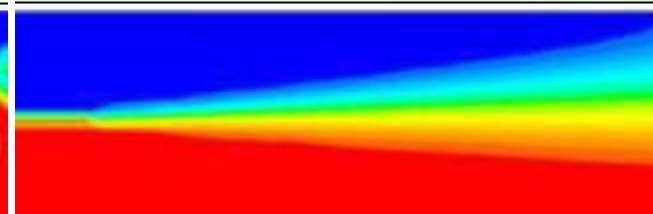
SRS

(Scale Resolving Simulations)



RANS

(Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulations)



- 直接求解非稳态纳威尔-斯托克斯方程
- 不需要附加模型
- 目前仅作为研究使用，对于工业应用来说成本太大

- 包含大涡模拟(LES)
- 可以对空间内一定范围直接求解大尺度涡的运动，小于网格尺度的涡由模型计算
- 非稳态

- 求解雷诺时均纳威尔-斯托克斯方程
- 对湍流依靠模型求解，不考虑大尺度涡特性。
- RANS湍流模型可以对湍流过程进行稳态计算
- 广泛应用于大多数工程流动

基于Fluent的最佳实践

■ RANS模型一般用于边界层流动

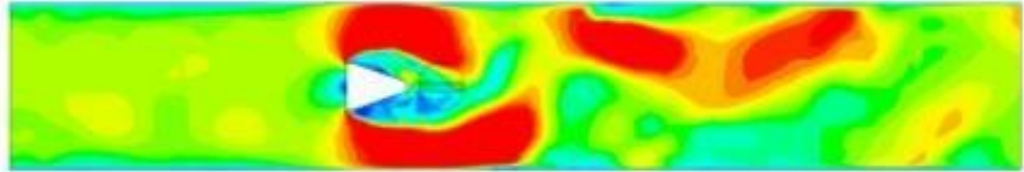
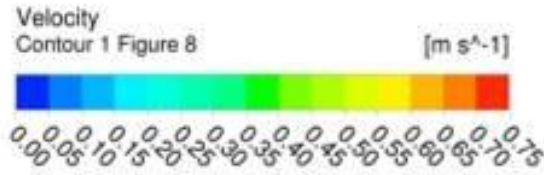
- y^+ 敏感型壁面处理方式
- 可以较准确的预测流动分离
- 可以计算旋流
- 可以计算台阶流
- 可以计算层流-湍流转捩

■ SRS (Scale-Resolving Simulation尺度求解)可以用于边界层流动、分离流动及自由剪切流动

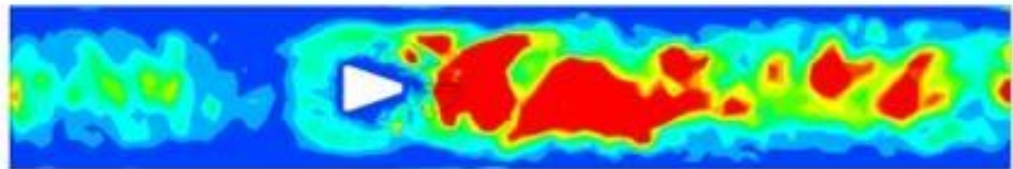
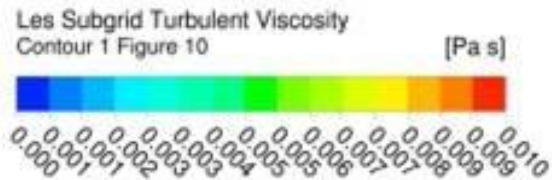
- SAS model
- (D)DES models
- Zonal/embedded models
- LES/WMLES
- Synthetic turbulence

基于Fluent的最佳实践

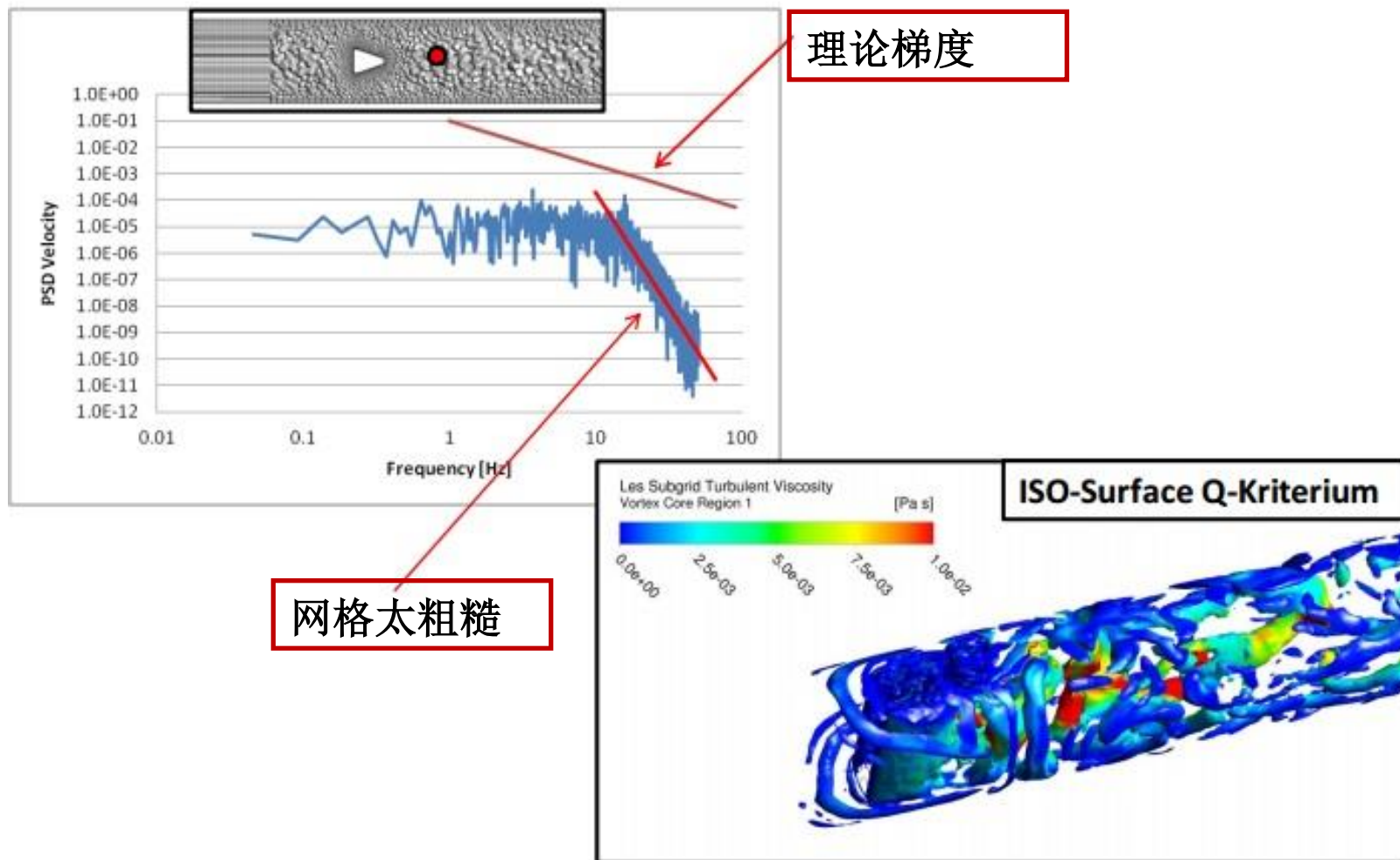
■ SRS模型的网格标定



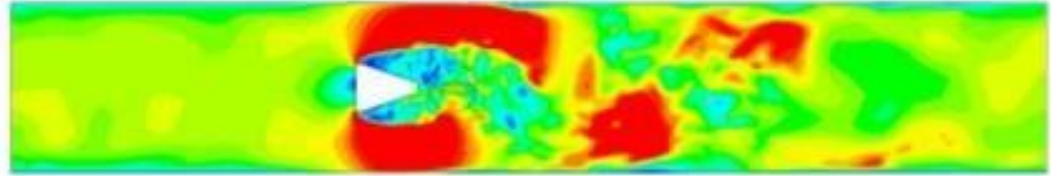
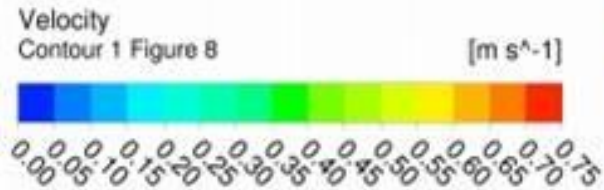
- 对于SRS，湍流粘性比 μ_T / μ_{water} 不要超过10。
- μ_{water} 等于0.001
- $\mu_T \geq 0.01$ 网格太粗糙



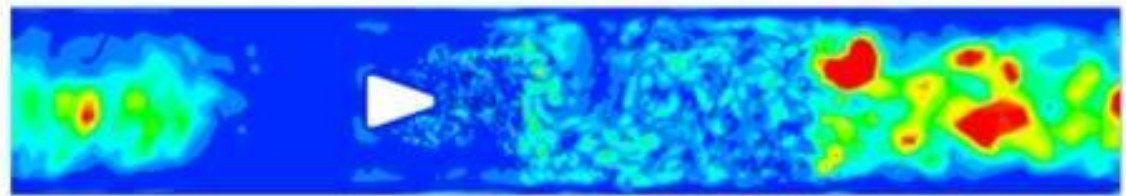
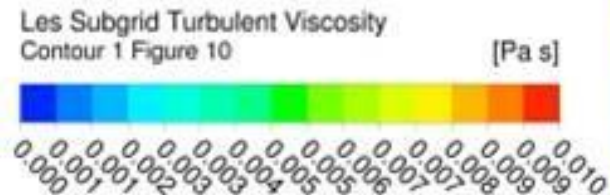
基于Fluent的最佳实践



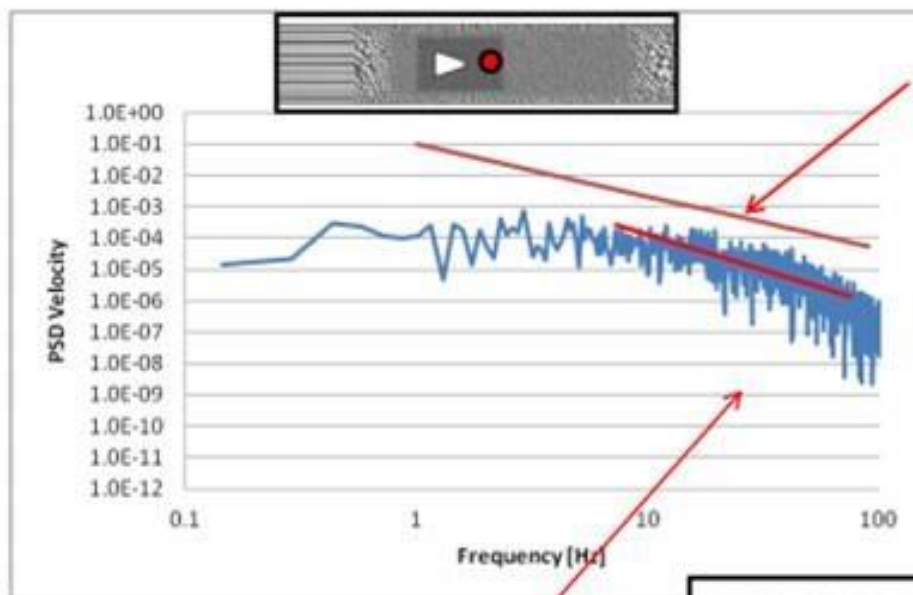
基于Fluent的最佳实践



- 细化网格。
- 关心区域湍流粘性比 $\frac{\mu_T}{\mu_{water}}$ 低于10

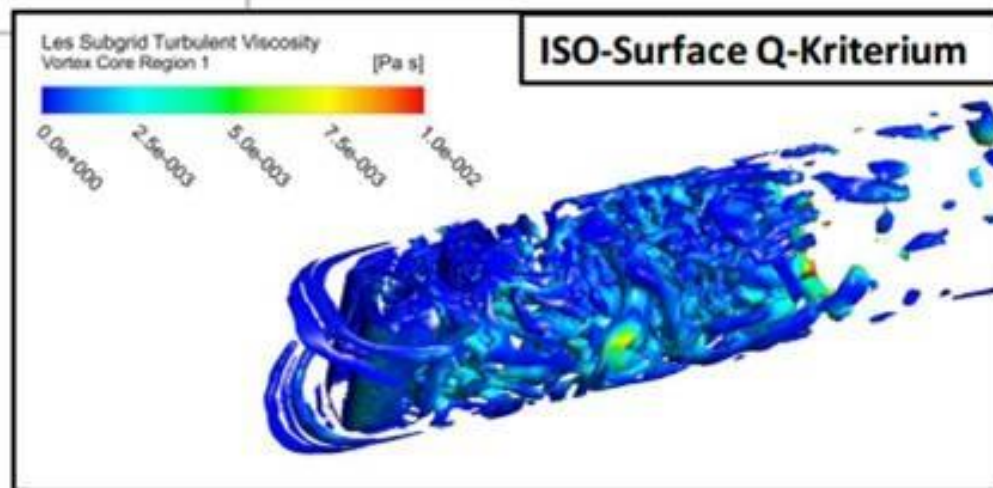


基于Fluent的最佳实践



理论梯度

网格足够精细



基于Fluent的最佳实践

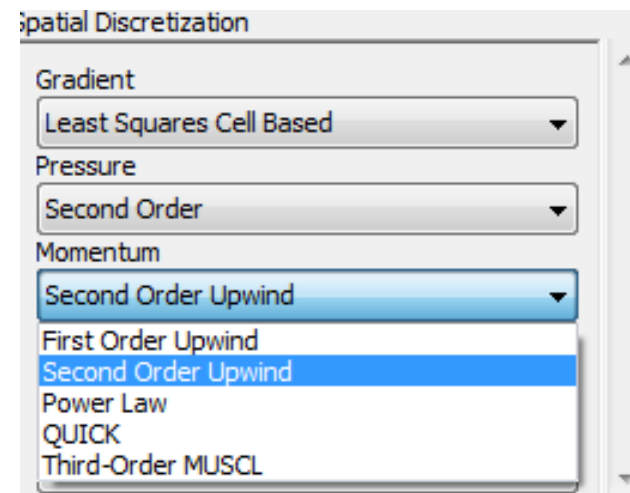
■ 空气动力学计算建议:

- 空气动力学表面(造型面)，有限CPU资源
 - ✓ Realizable k-e models + 壁面函数 ($y^+ > 30$)
- 空气动力学表面(造型面)，足够CPU资源
 - ✓ k-w SST model 或 transition k-w models ($y^+ \sim 1$)
- 钝体(整车)，有限CPU资源
 - ✓ Realizable k-e models + 壁面函数 ($y^+ > 30$)
- 钝体(整车) y^+ ，足够/大规模 CPU 资源
 - ✓ 非稳态(D)DES/(E)LES/SAS 模型
 - 计算至稳定收敛结果
 - 计算物理时间至少3-4 倍 $T=L/U$ (L 计算域尺度, U 车速)，使用1.5T之后的结果数据进行统计

基于Fluent的最佳实践

■ 差分格式的选择

- 丰富的差分格式
- 保证求解精度
 - ✓ 一阶精度，二阶精度，三阶精度
- 保证计算收敛

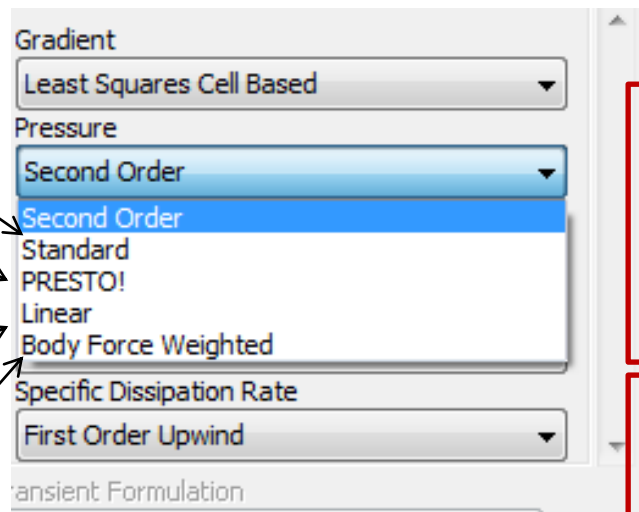


压力变化不剧烈

主要用于高漩涡流

其他项不收敛或出现非物理现象

高雷诺数自然对流



在汽车行业，模型不复杂，压力采用二阶差分，其他采用二阶迎风差分，满足精度要求。

一般来说，压力的二阶差分就可以满足要求

基于Fluent的最佳实践

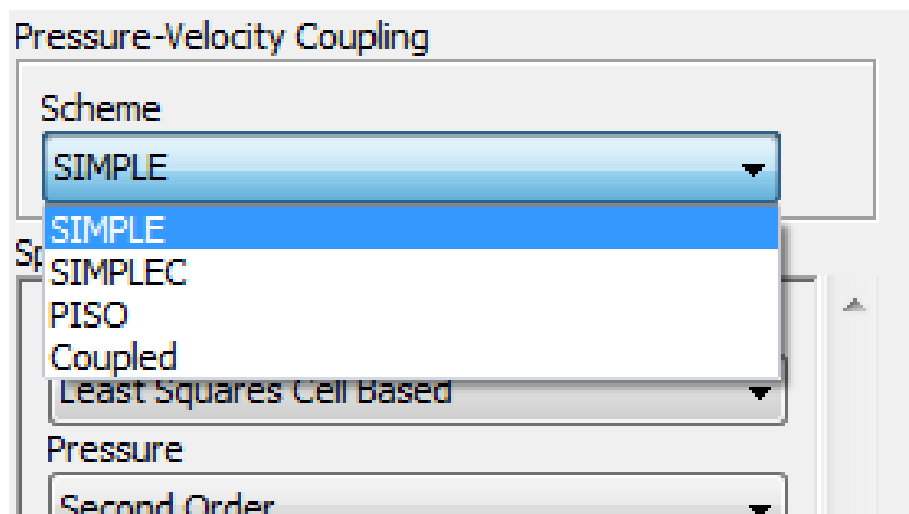
■ 求解格式的选择

➤ 求解格式多样性

✓ SIMPLE、SIMPLEC、PISO、Coupled

➤ 不同问题采用不同求解格式，保证问题的准确性。

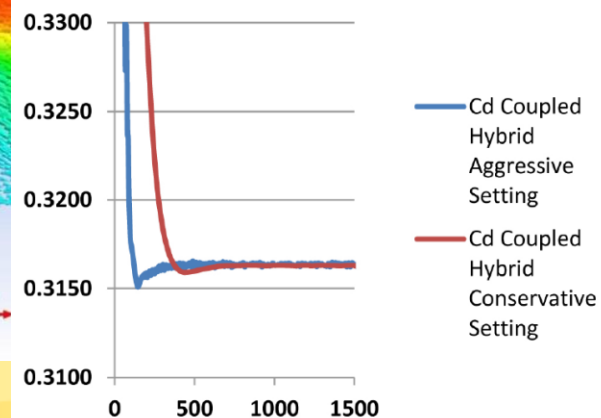
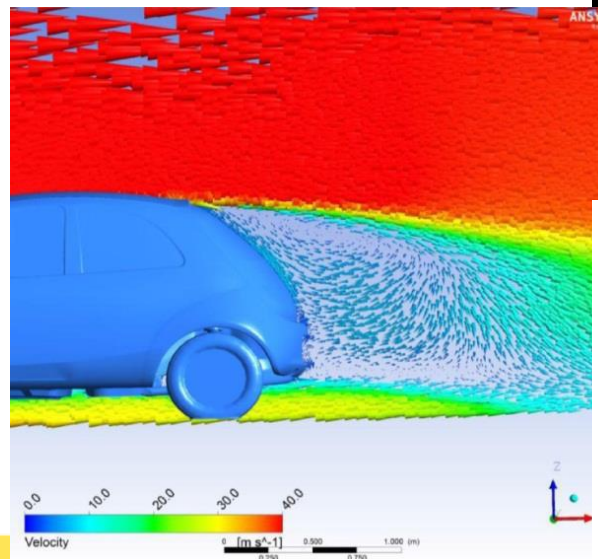
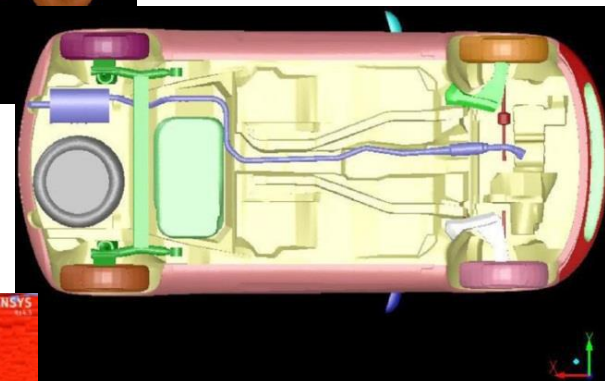
- SIMPLE对于网格质量有一定要求。
- SIMPLEC允许有一定偏斜(skewness)网格存在。
- PISO用于瞬态求解。
- Coupled可以用于基于压力求解也可以用于基于密度求解，允许有允许有一定偏斜网格存在。



基于Fluent的最佳实践

■ 案例1

- **Ford Ka**
- 1800万 多面体网格
- $y^+ \sim 30 \dots 300$
- RKE + 非平衡壁面
- wall-function
- 8h on 24 CPUs

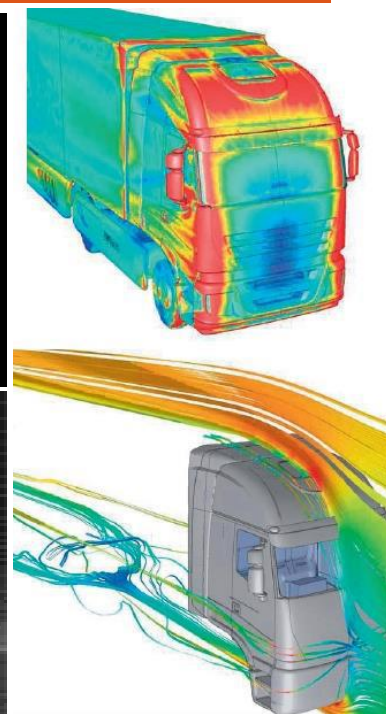
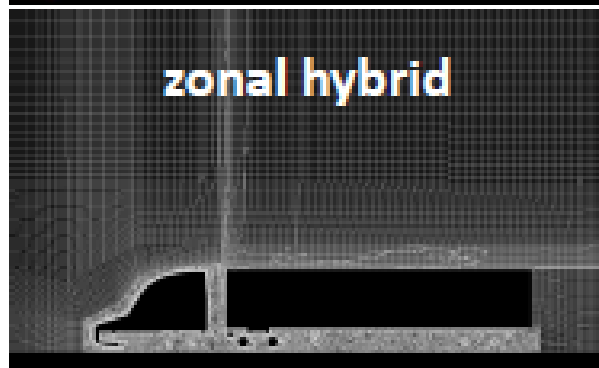
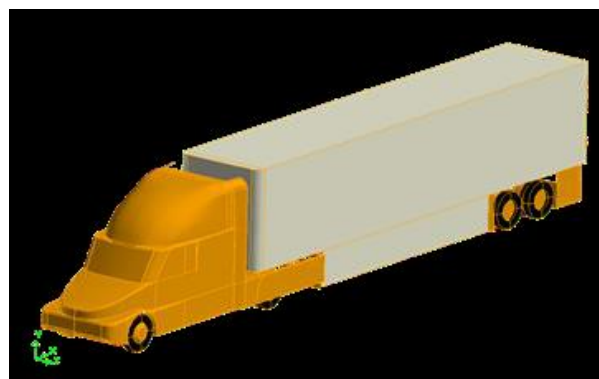
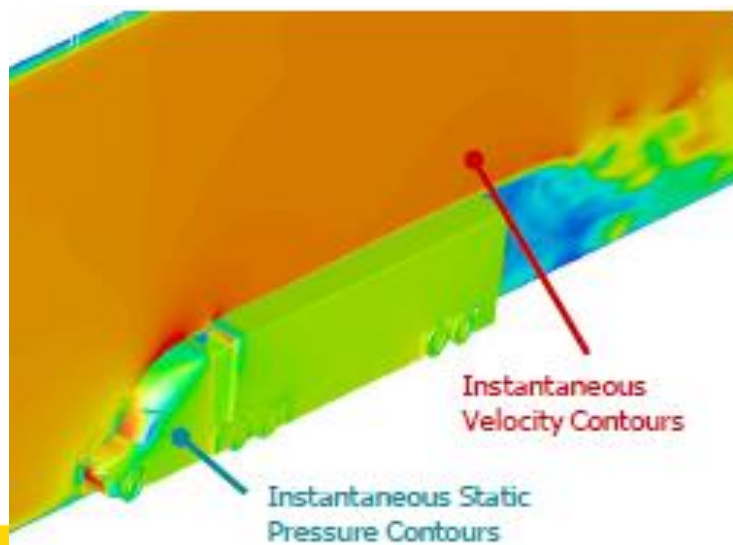


Cd (data)	Cd (CFD)	Δcd [%]
0.321	0.3207	0.09

基于Fluent的最佳实践

■ 案例2

- 卡车拖车侧风空气动力学计算
- 侧风摆角 0° , 6°
- 稳态/瞬态对比
- (U)RANS vs. SRS



Yaw Angle	Solver	Meshing Strategy	Turbulence Model	Deviation from Expt.
0°	Steady State	Traditional Tet	Realizable k-s	+13.3%
0°	Transient	Traditional Tet	RNG k-s	+8.0%
0°	Steady State	Zonal Hybrid	Realizable k-s	-1.6%
0°	Transient	Zonal Hybrid	RNG k-s	0.0%
6°	Transient	Zonal Hybrid	RNG k-s	+3.8%
0°	Transient	Zonal Hybrid	DES	+0.77%
6°	Transient	Zonal Hybrid	DES	-3.5%

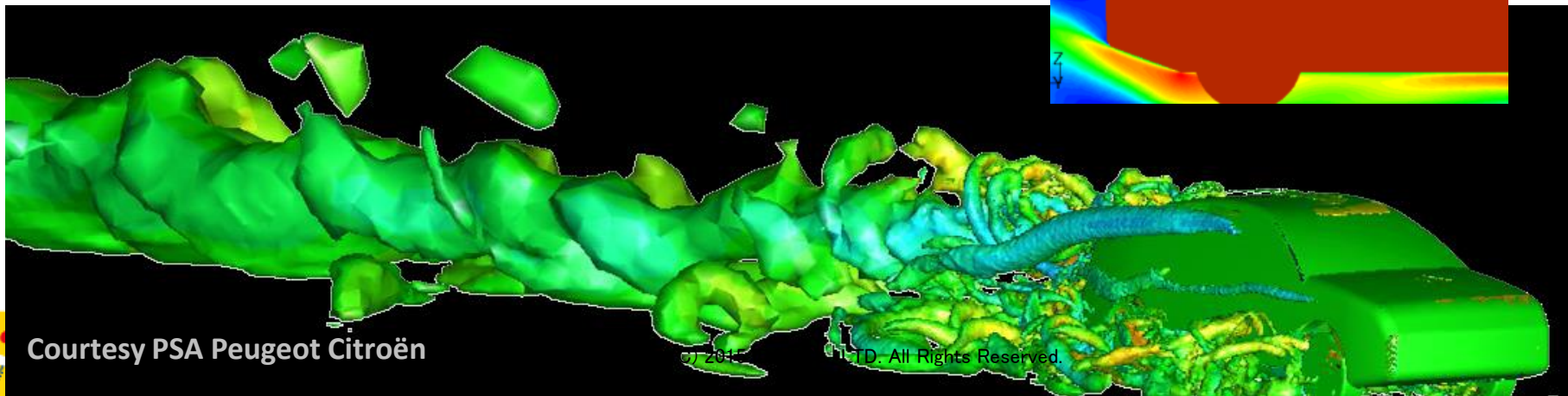
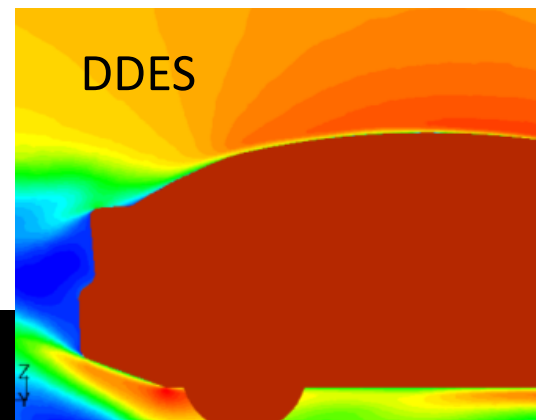
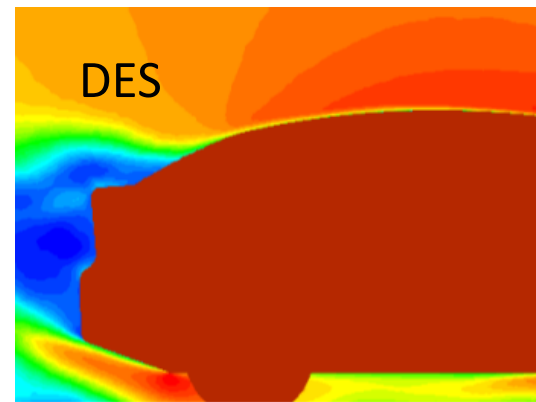
Note: Traditional Tet Strategy = 5.5M cells, Zonal Hybrid Strategy = 8.3M cells

基于Fluent的最佳实践

■ 案例3

- PSA Peugeot Citroen侧风
外气动计算
- 40m/s, 摆角20°
- DDES模型
 - DES模型受网格影响产生
分离

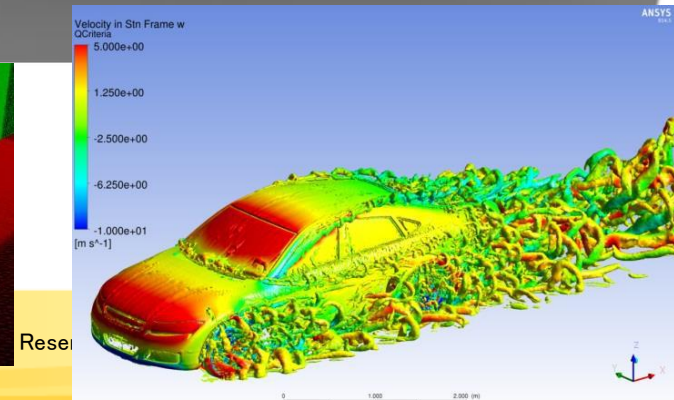
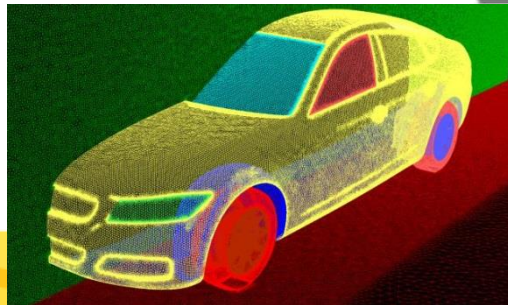
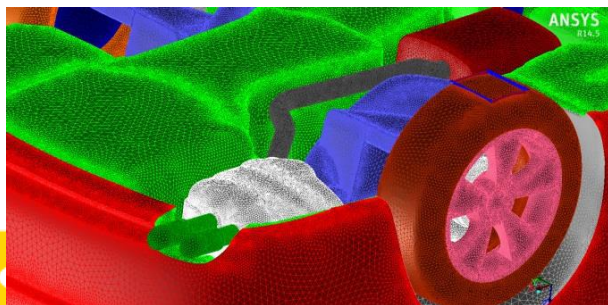
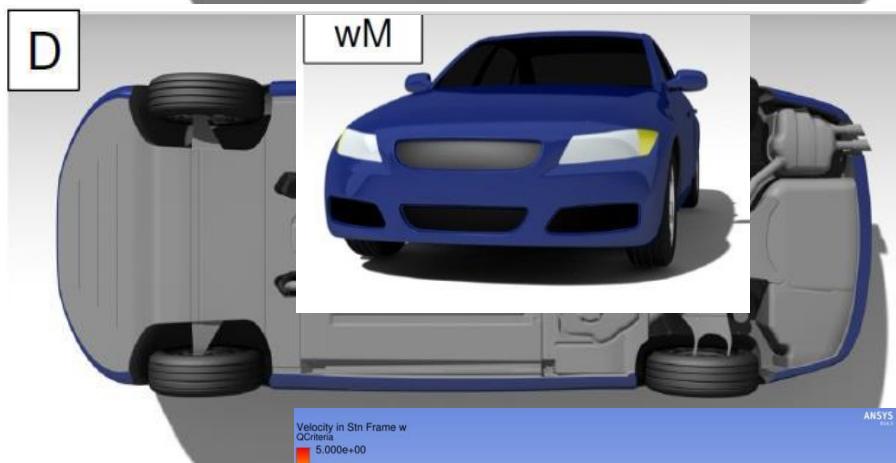
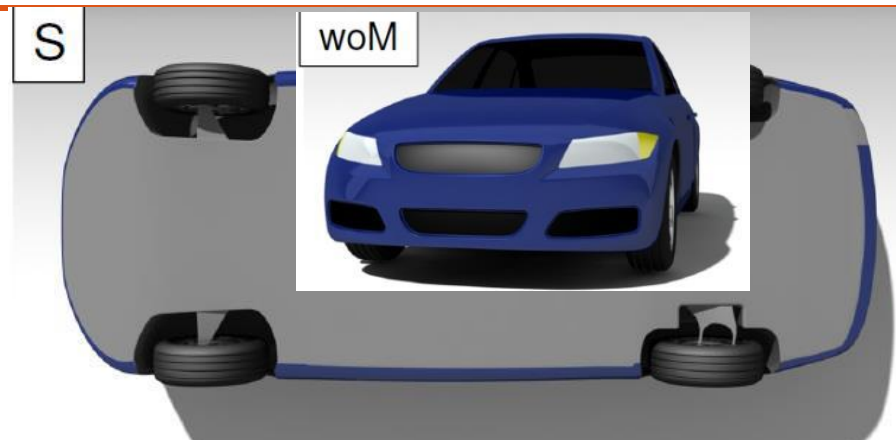
Model	Exp.	DDES	DES	LES
Drag (SCx)	0.70	0.71	0.75	0.69



基于Fluent的最佳实践

■ 案例4

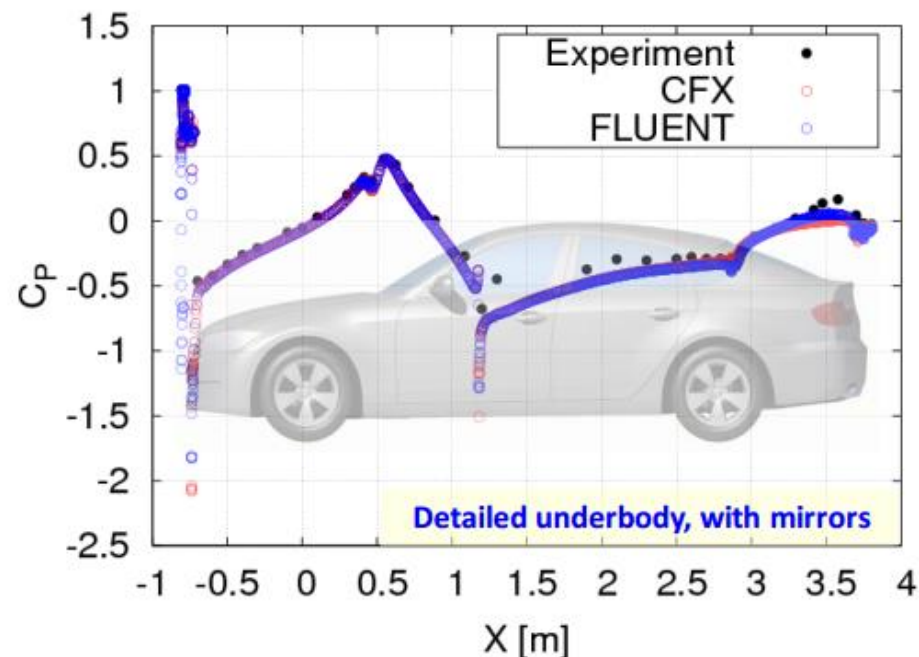
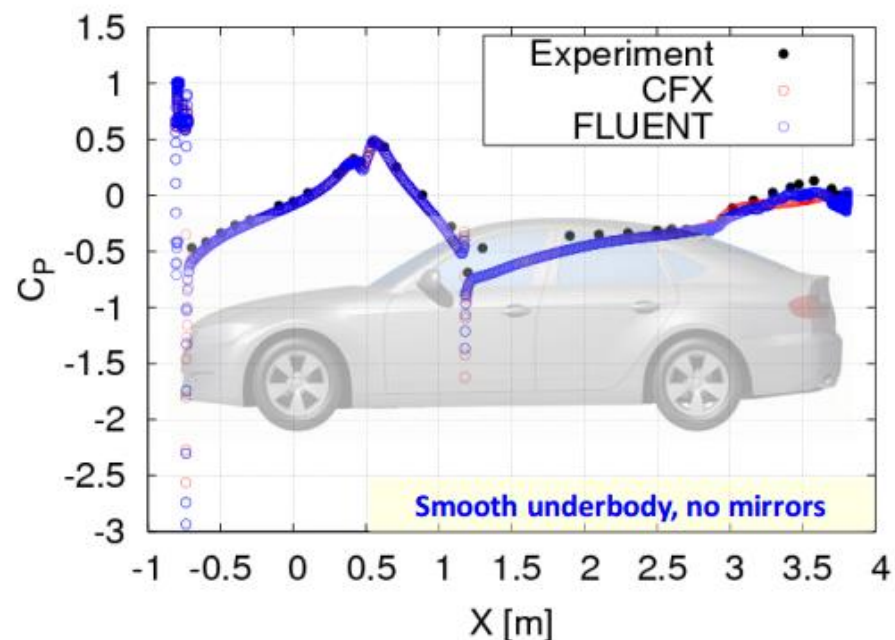
- DrivAer外气动计算
- BMW3和AUDI A4的组合造型
- 1.13亿网格， $Y_{plus} \leq 1$
 - ✓ 车身15层边界层网格
 - ✓ 路面20层边界层网格
- 稳态计算
 - ✓ 15小时(168核)
- 瞬态计算
 - ✓ ~15天，3s物理时间



基于Fluent的最佳实践

■ 案例4

➤ 压力系数



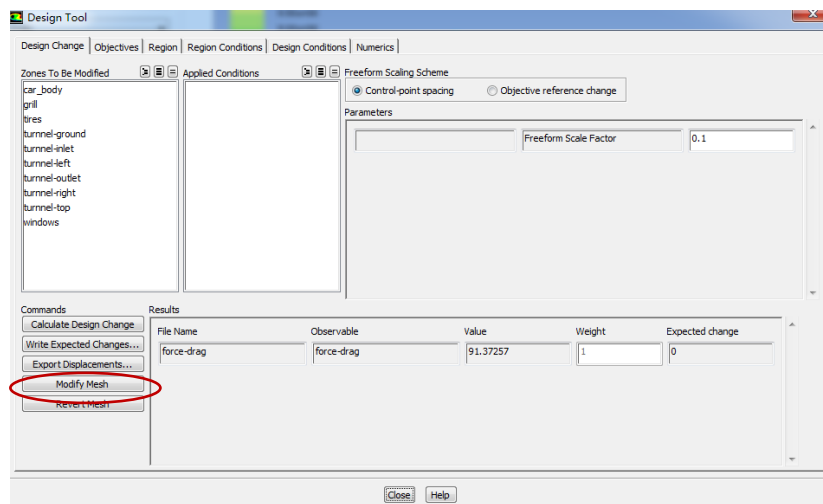
目录

- 空气动力学重要性
- 基于Fluent的最佳实践
- 优化方案
 - 1.Adjoint Solver优化方案
 - 2.Fluent与modeFRONTIER的耦合优化方案
- 总结

优化方案

Fluent有自带优化工具以及和modeFRONTIER耦合优化

- Adjoint solver中的design tool可以对模型进行优化修改，此工具主要对简单模型进行修改，复杂模型可以采用Fluent中的RBF-morph工具。



- 对于前期有多种CAD方案时，采用Fluent和modeFRONTIER耦合优化比较好的选择。

Adjoint Solver优化方案

■ 方案介绍

- 在传统的流动求解基础上进行求解
- 通过对形状灵敏度的求解，在已有的CAD模型基础上进行造型优化。

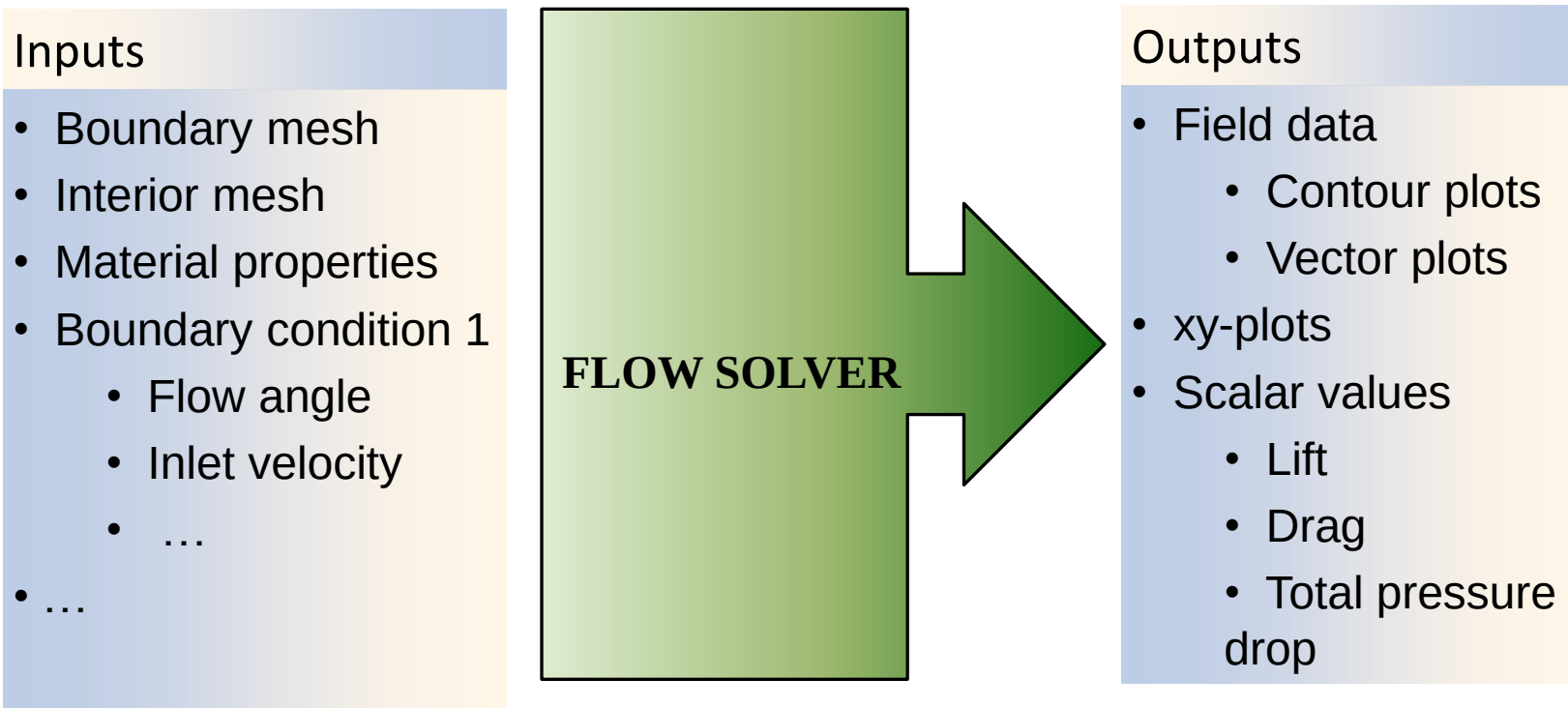
■ 伴随求解器概述

- 伴随求解器是一种特殊工具，它是基于传统的流体求解的扩充。
- 如果对某问题的任一输入参数进行改变，那么计算结果也随之改变，计算结果改变程度取决于某特定参数调节的灵敏程度。
- 一个高灵敏系统在性能上因输入的小变化而表现出输出的强烈变化。性能灵敏度意味着有问题设备没有充分优化，仍然有改进空间。

Adjoint Solver优化方案

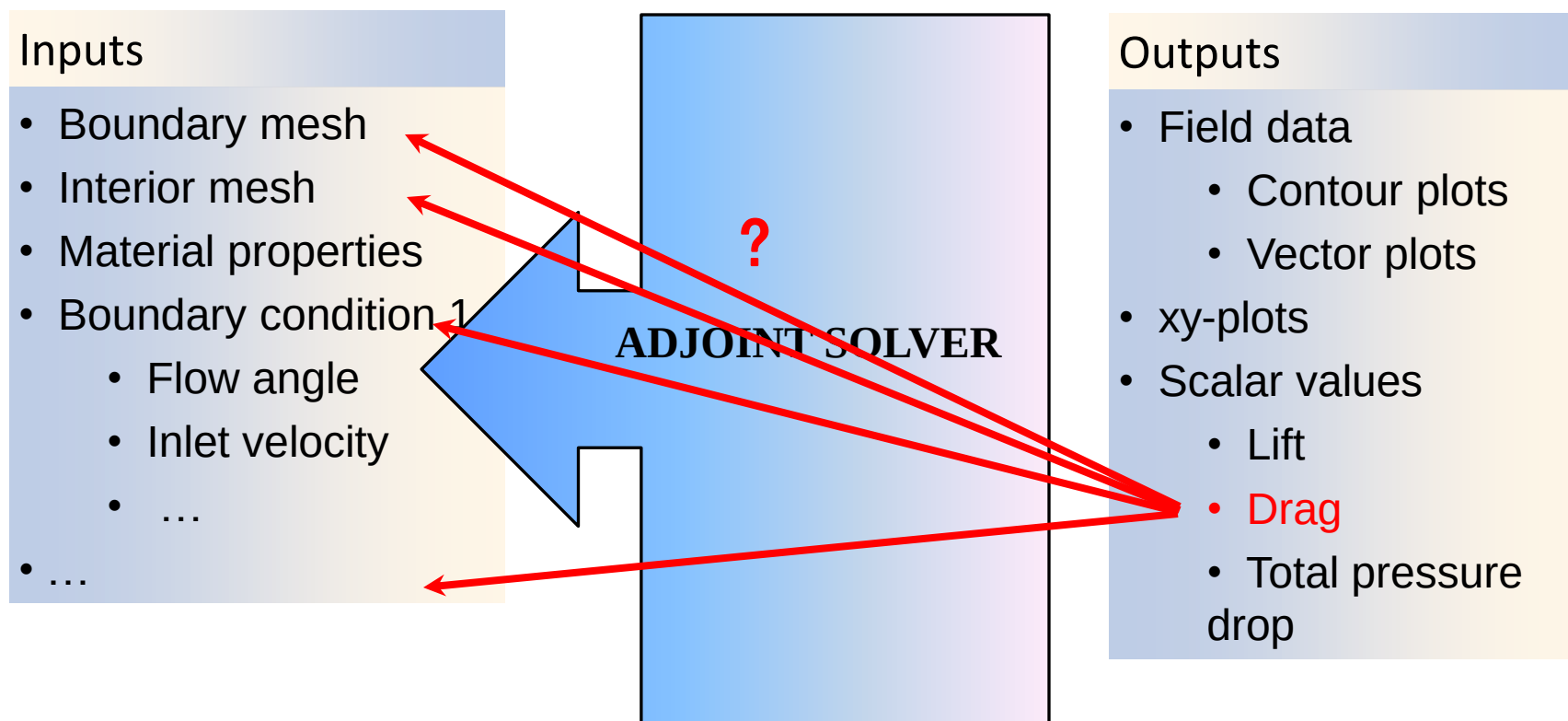
■ 伴随求解器的基本原理

传统流动求解器的工作流程



Adjoint Solver优化方案

关键输出量的变化是如何依赖输入的变化



Adjoint Solver 优化方案

求解量 $\underline{q}$ 和问题输入量 $\underline{c}$.

输出

$$J(\underline{q}; \underline{c})$$

$$R(\underline{q}; \underline{c}) = \underline{0}$$

N-S方程的残差

输入 $\underline{c}$, 变化 $\delta \underline{c}$

输出变化

$$\delta J = \frac{\partial J}{\partial \underline{q}} \delta \underline{q} + \frac{\partial J}{\partial \underline{c}} \delta \underline{c}$$

$$\frac{\partial R}{\partial \underline{q}} \delta \underline{q} + \frac{\partial R}{\partial \underline{c}} \delta \underline{c} = \underline{0}$$

线性化N-S

结合线性化的N-S方程构造一个特殊的线性 - 引入乘数 $\tilde{\underline{q}}$

伴随方程

$$\left(\frac{\partial R}{\partial \underline{q}} \right)^T \tilde{\underline{q}} = \frac{\partial J}{\partial \underline{q}}$$

$$\left[\left(\tilde{\underline{q}} \right)^T \frac{\partial R}{\partial \underline{q}} \right] \delta \underline{q} + \left(\tilde{\underline{q}} \right)^T \frac{\partial R}{\partial \underline{c}} \delta \underline{c} = 0$$

替换后

输出变化

$$\delta J = \left(\frac{\partial J}{\partial \underline{c}} - \tilde{\underline{q}}^T \frac{\partial R}{\partial \underline{c}} \right) \delta \underline{c}$$

输入变化

Adjoint Solver优化方案

$$\left(\frac{\partial \underline{R}}{\partial \underline{q}} \right)^T \underline{\tilde{q}} = \frac{\partial J}{\partial \underline{q}}$$

这个系统方程是伴随求解器的核心

更新伴随求解

$$\underline{\underline{M}} \cdot \underline{\Delta \tilde{q}} = \frac{\partial J}{\partial \underline{q}} - \left(\frac{\partial \underline{R}}{\partial \underline{q}} \right)^T \underline{\tilde{q}}$$

引入伪时间步，近似线性化。
与流动求解器相似。

相对于流动求解的工程监测导数

系统雅克比

Adjoint Solver优化方案

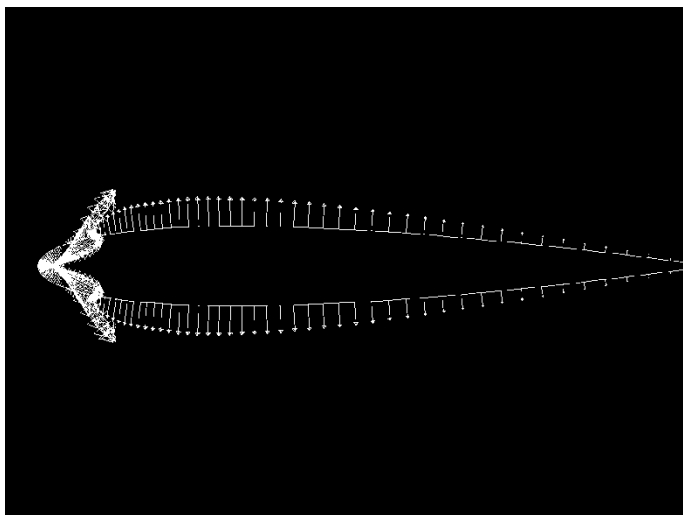
■ 形状灵敏度

➤ 形状灵敏度：相对于边界网格节点位置的监测值的灵敏度。

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

节点位移

形状灵敏度系数：
在网格节点上定义矢量域



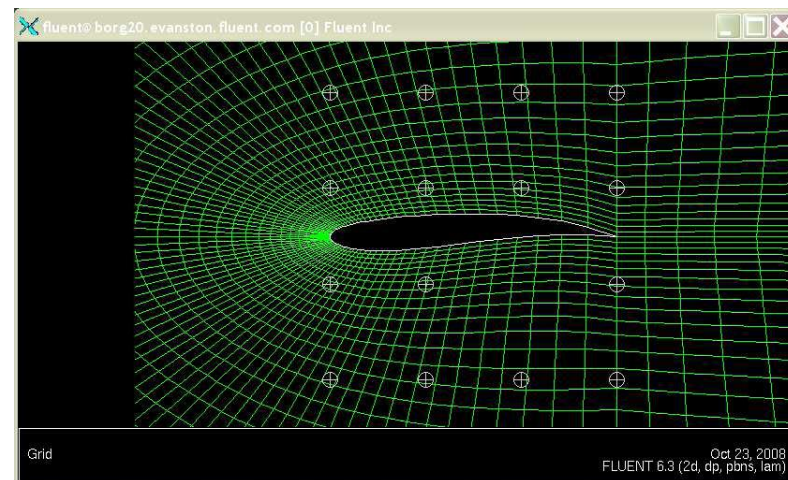
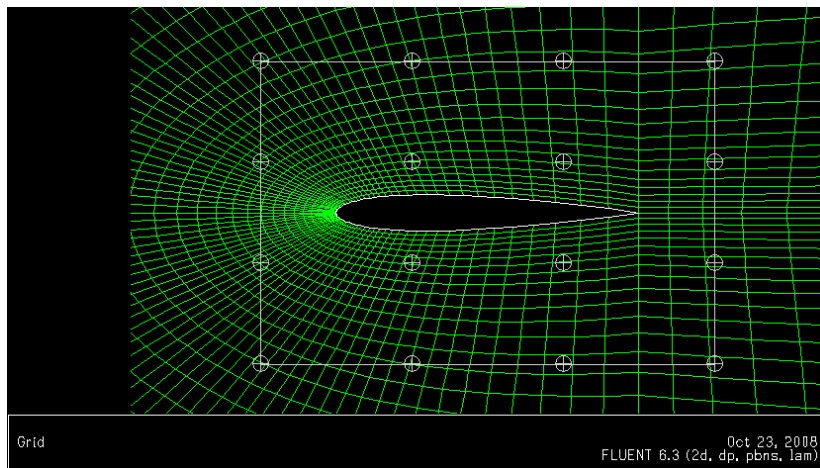
形状灵敏度的可视化

- 使用矢量场可视化。
- 识别区域高低灵敏度。
- 这些地方的外形改变对关心的量有很大影响。
- 指定当前关心的量和当前的流动状态。

Adjoint Solver优化方案

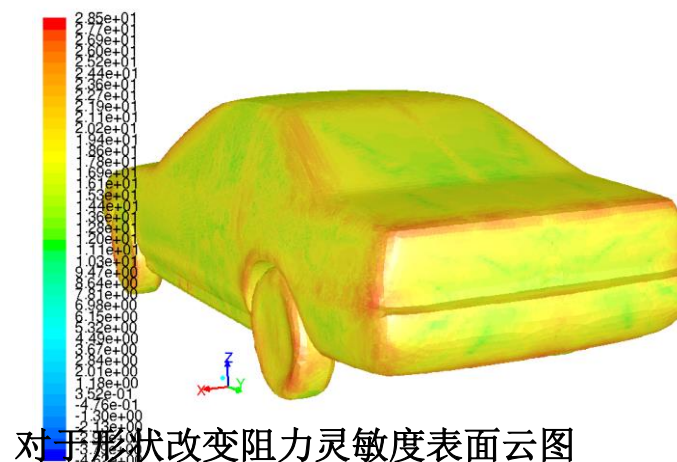
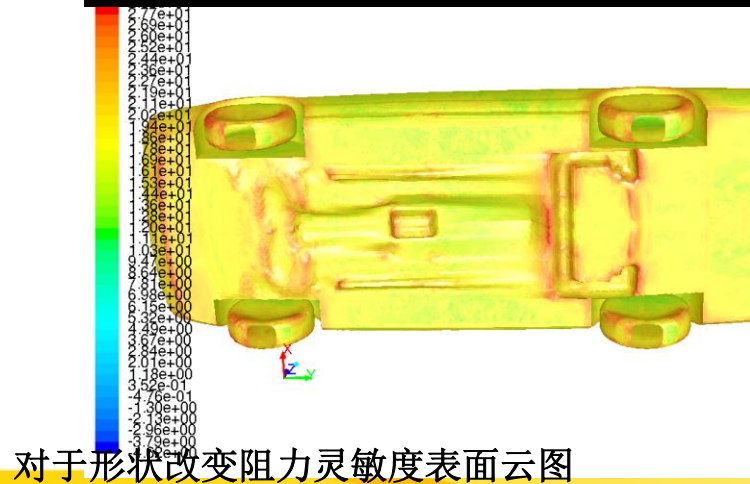
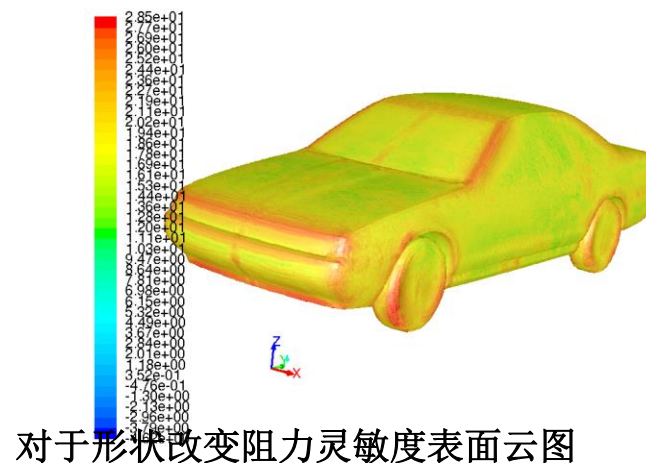
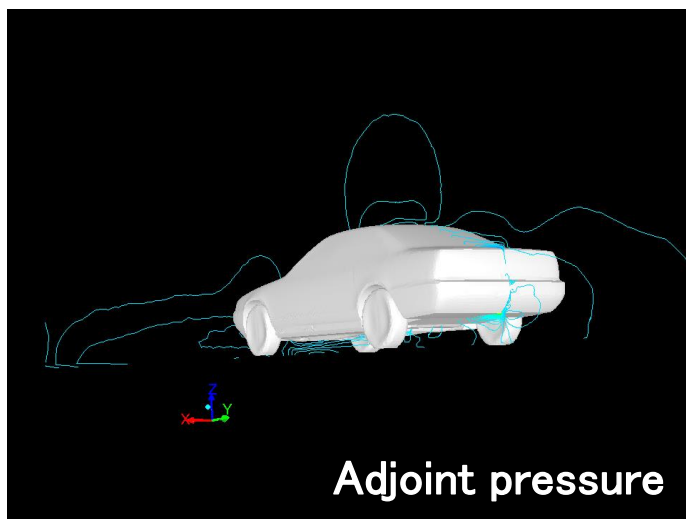
■ 网格变形

- 指定某局部区域进行网格变形



Adjoint Solver优化方案

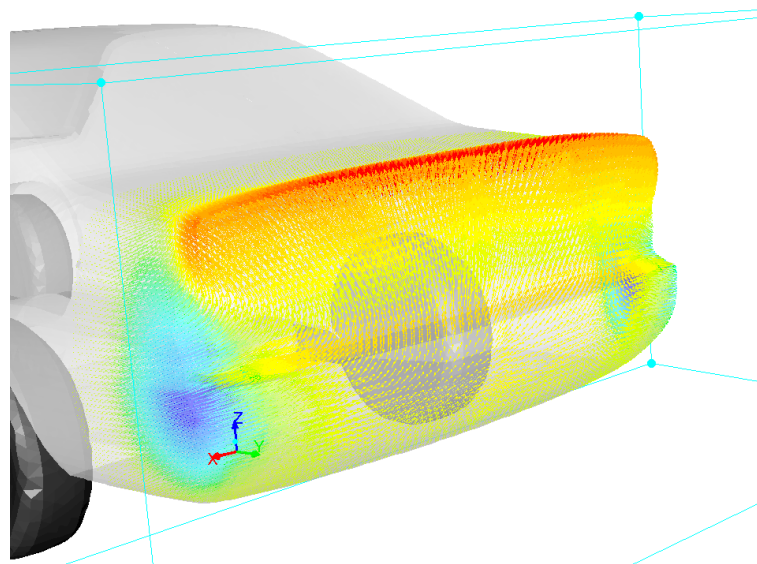
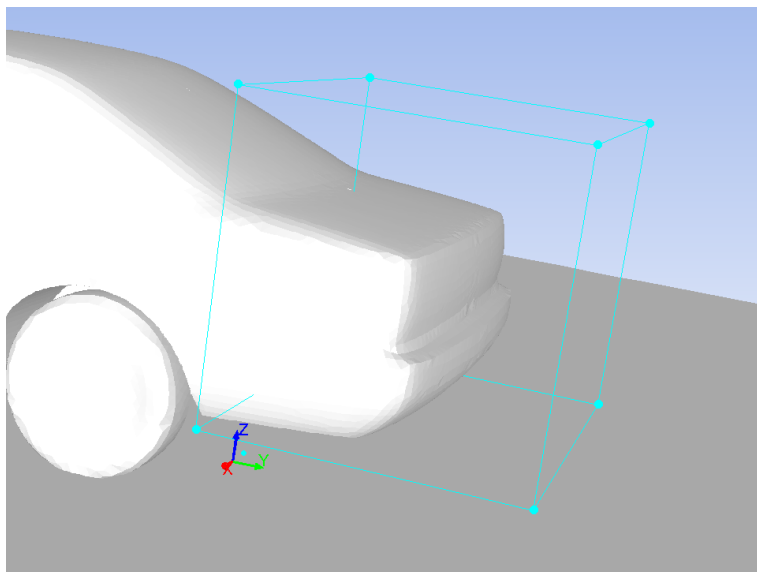
■ 案例1：整车造型



Adjoint Solver优化方案

■ 案例1

- 选择封闭的上部分车尾拐角作为控制体
- 结果统计(Half vehicle)
 - ✓ Baseline drag = 125.8N
 - ✓ Expected change = -1.1N
 - ✓ Actual change = -1.0N

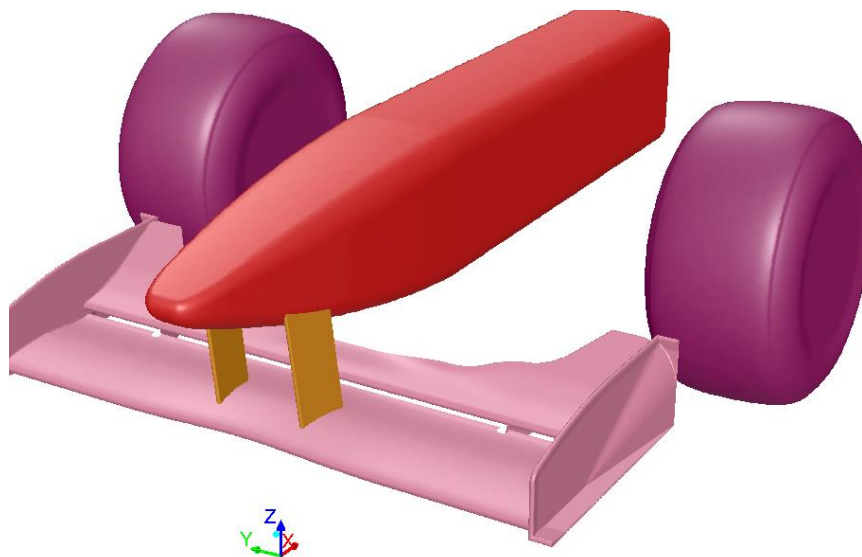


表面位移向量场

Adjoint Solver优化方案

■ 案例2：（部件级）F1 前翼

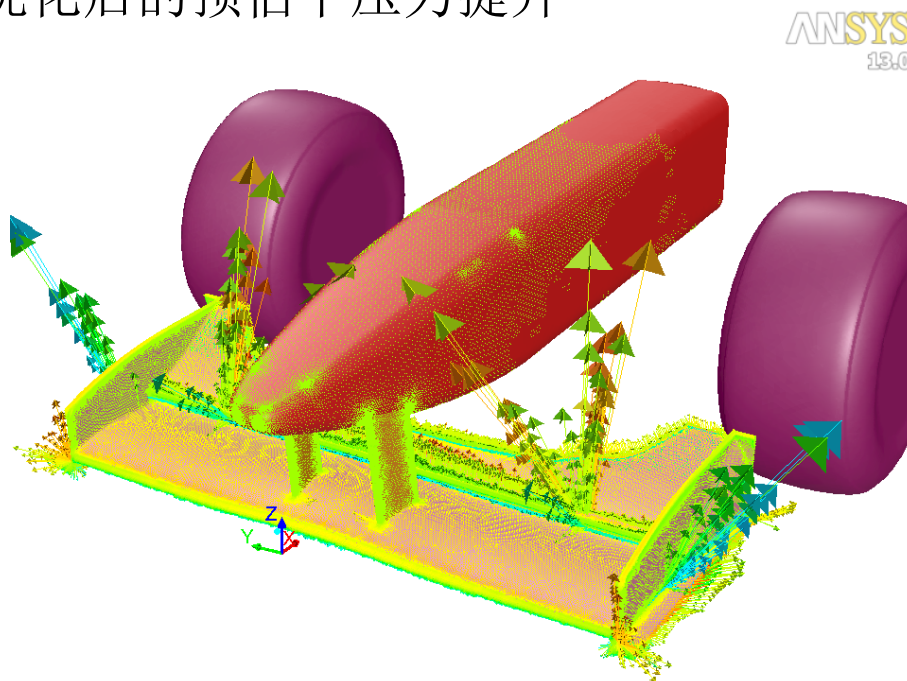
- 优化目标：增大下压力
- 首先采用标准空气动力学计算获得基础模型流场；
- 运行adjoint求解器或侧下压力优化建议



Adjoint Solver优化方案

■ 案例2：（部件级）F1 前翼

- 输出前翼形状对下压力影响的敏感度(高敏感度区域和低敏感度区域)
- 输出影响下压力的造型定量变更信息；
- 输出优化后的预估下压力提升



Fluent与modeFRONTIER的耦合优化方案

■ 方案介绍

➤ 集成方案

- ✓ CFD求解器: FLUENT
- ✓ 优化软件: modeFRONTIER
- ✓ 网格变形工具: MeshWorks

➤ 系统级优化:

- 适合处理参数化优化变量;
- 基于优化软件可以加速优化过程。

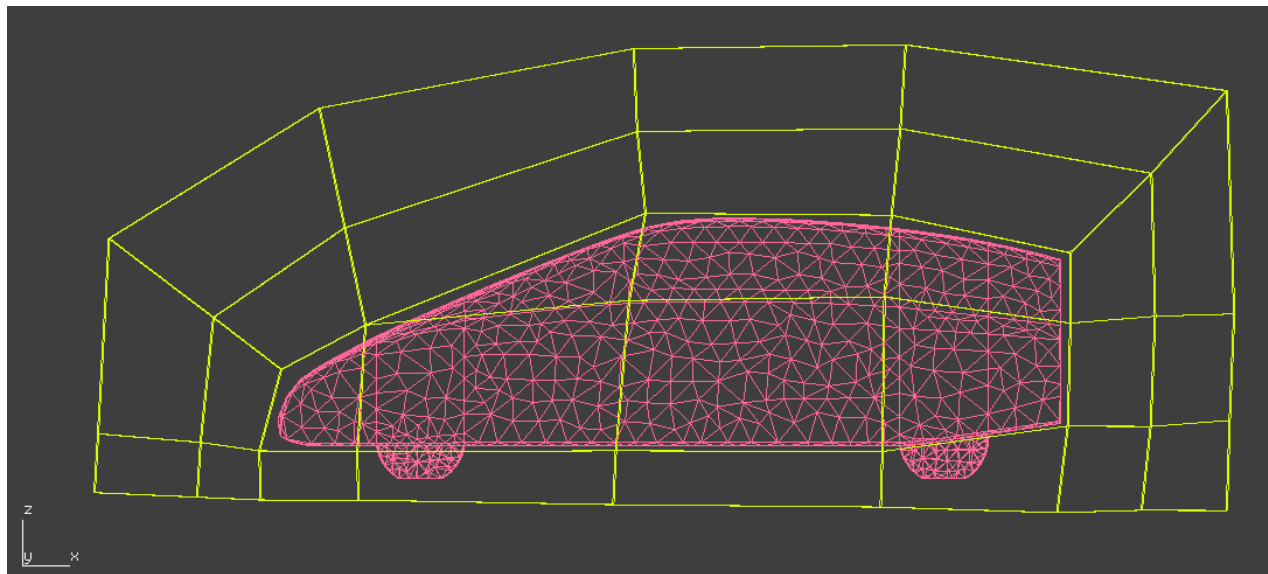
Fluent与modeFRONTIER的耦合优化方案

■ 案例介绍

- 优化变量：车体造型提取形状参数
- 优化目标：
 - ✓ 阻力系数 C_d 最小；
 - ✓ 升力系数 C_L 最小；
- 使用软件：
 - ✓ Fluent进行CFD计算并给出阻力/升力系数数据；
 - ✓ DEP MeshWorks/Morpher进行网格变形
 - ✓ modeFRONTIER集成上述软件并进行优化

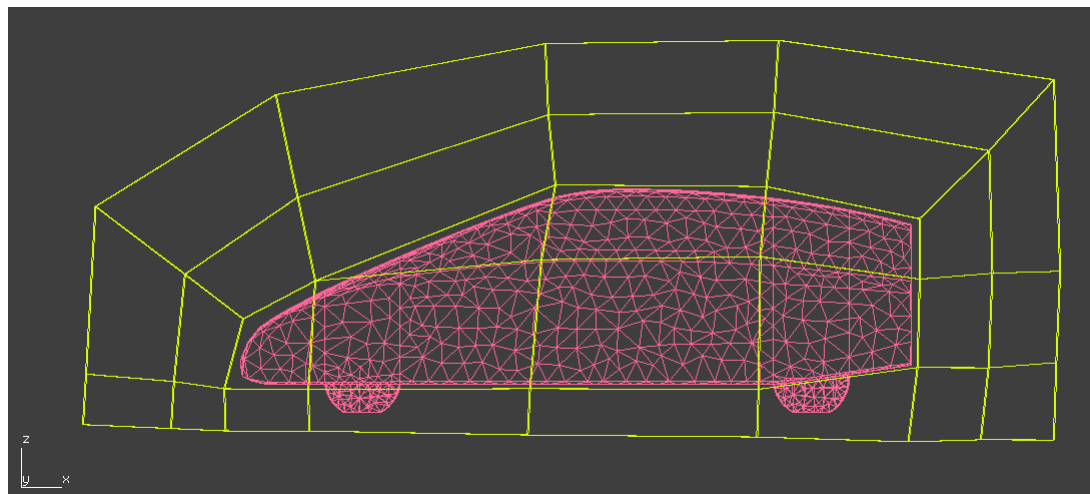
Fluent与modeFRONTIER的耦合优化方案

■ Meshworks中网格变形设置

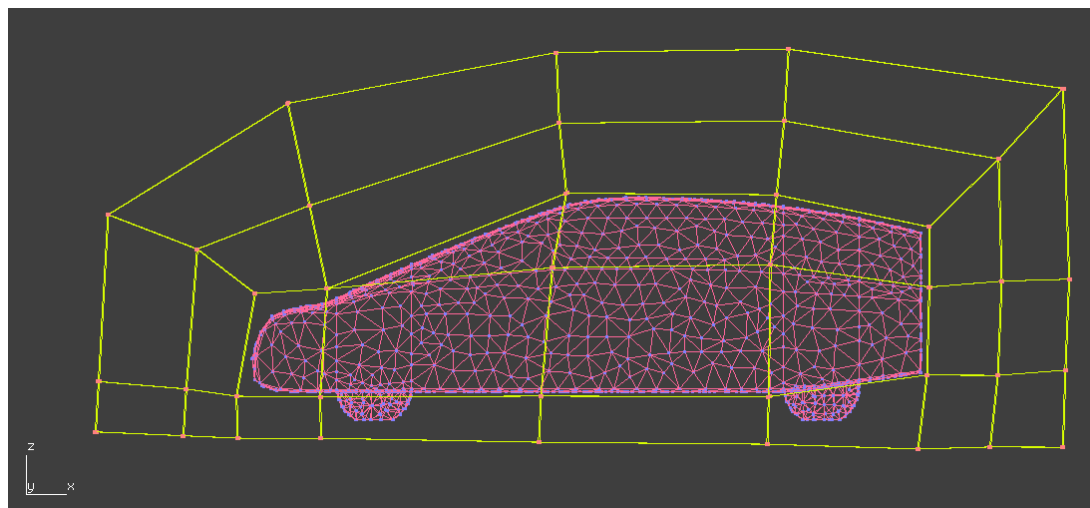


- 如图建立控制块，分别移动不同的指定节点，驱动控制块变形，从而带动网格相应变形。
- 共建立了四个不同的参数来控制变形；
- 注意图中只显示了车体表面网格，实际变形是针对整个流场的体网格

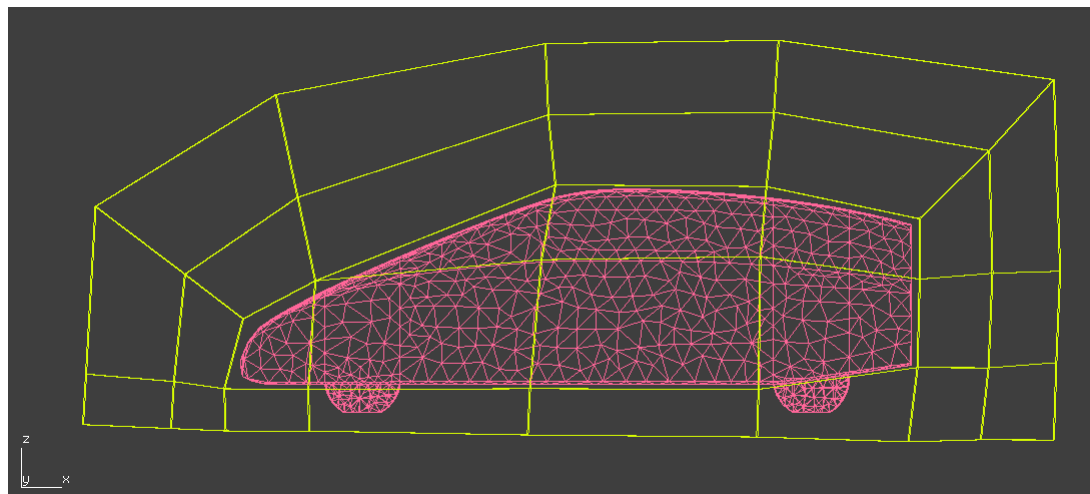
Fluent与modeFRONTIER的耦合优化方案



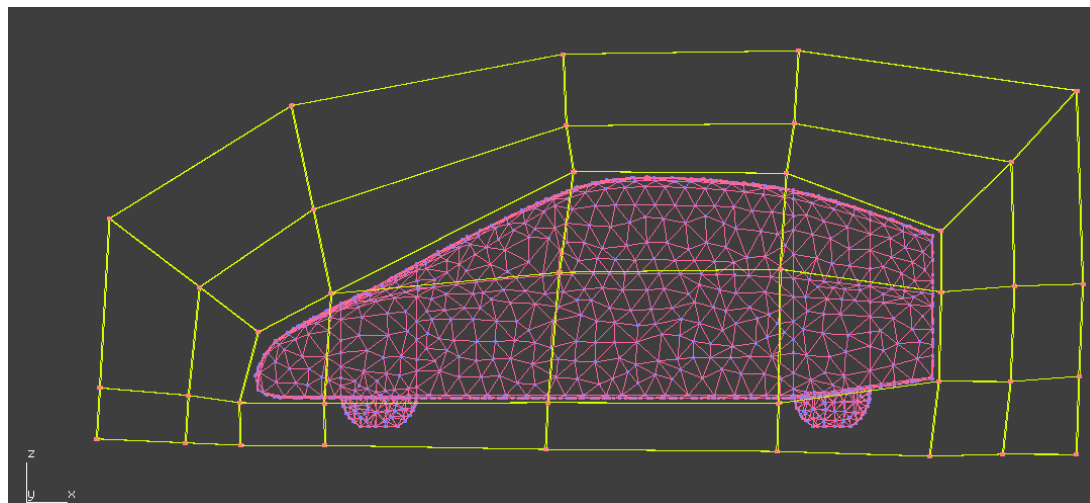
■ dv1对应车前盖角度



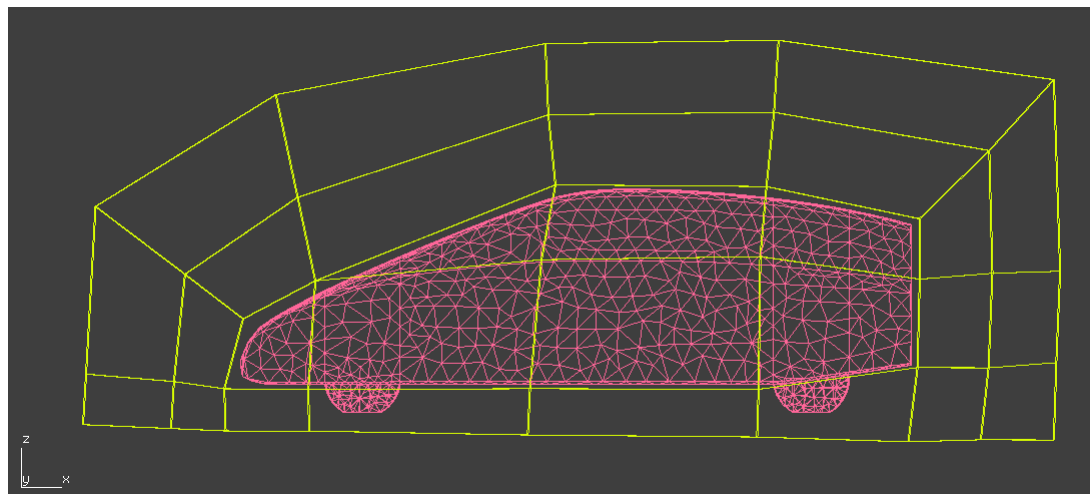
Fluent与modeFRONTIER的耦合优化方案



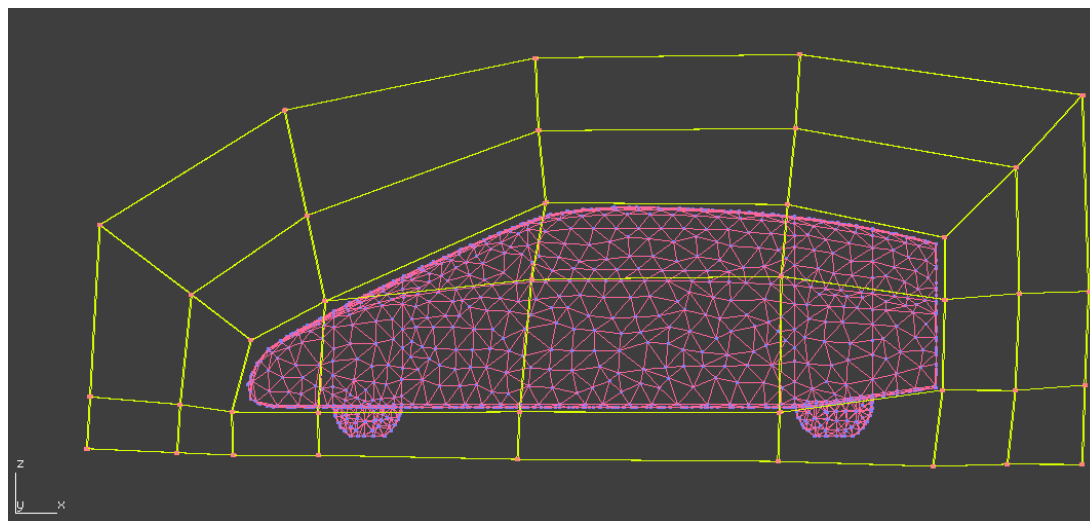
■ dv2对应车顶高度



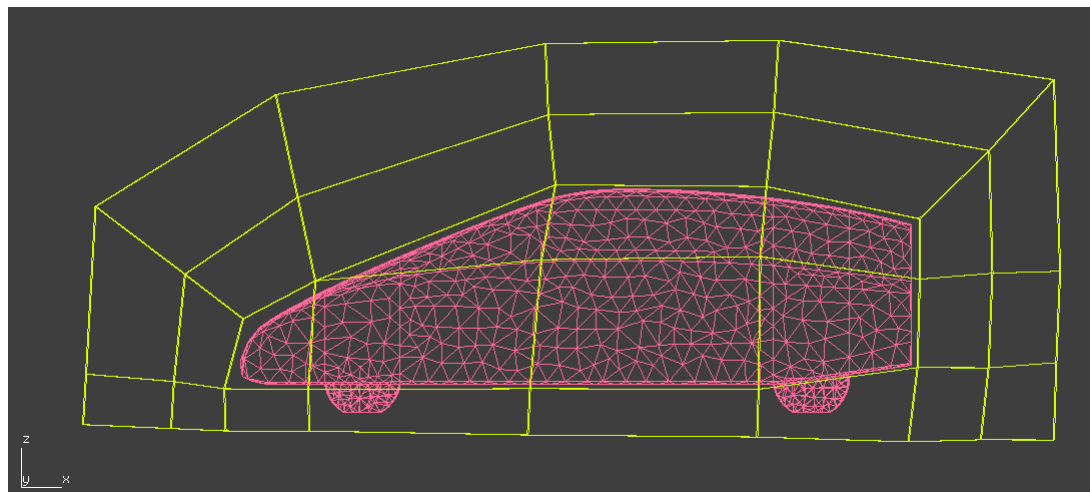
Fluent与modeFRONTIER的耦合优化方案



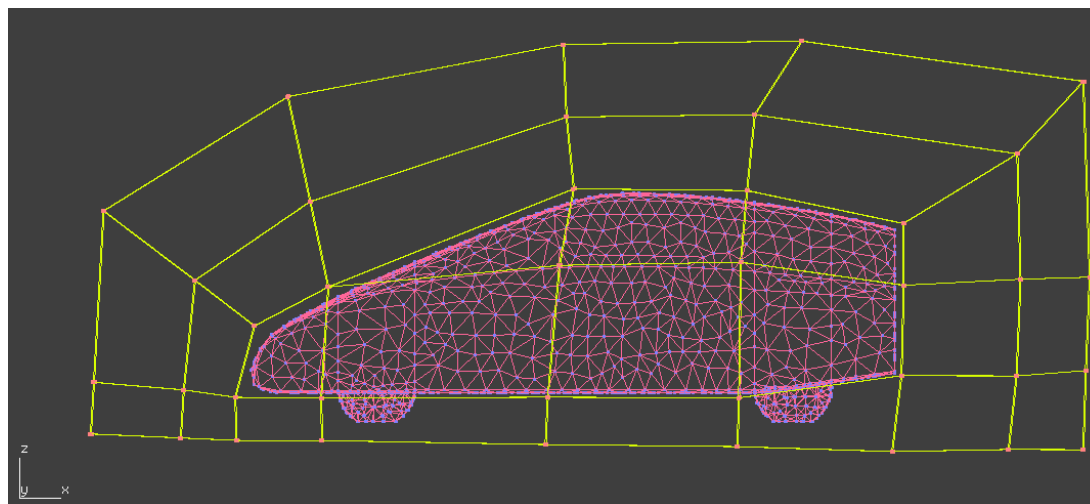
■ dv3对应车体中部和前端长度比例



Fluent与modeFRONTIER的耦合优化方案

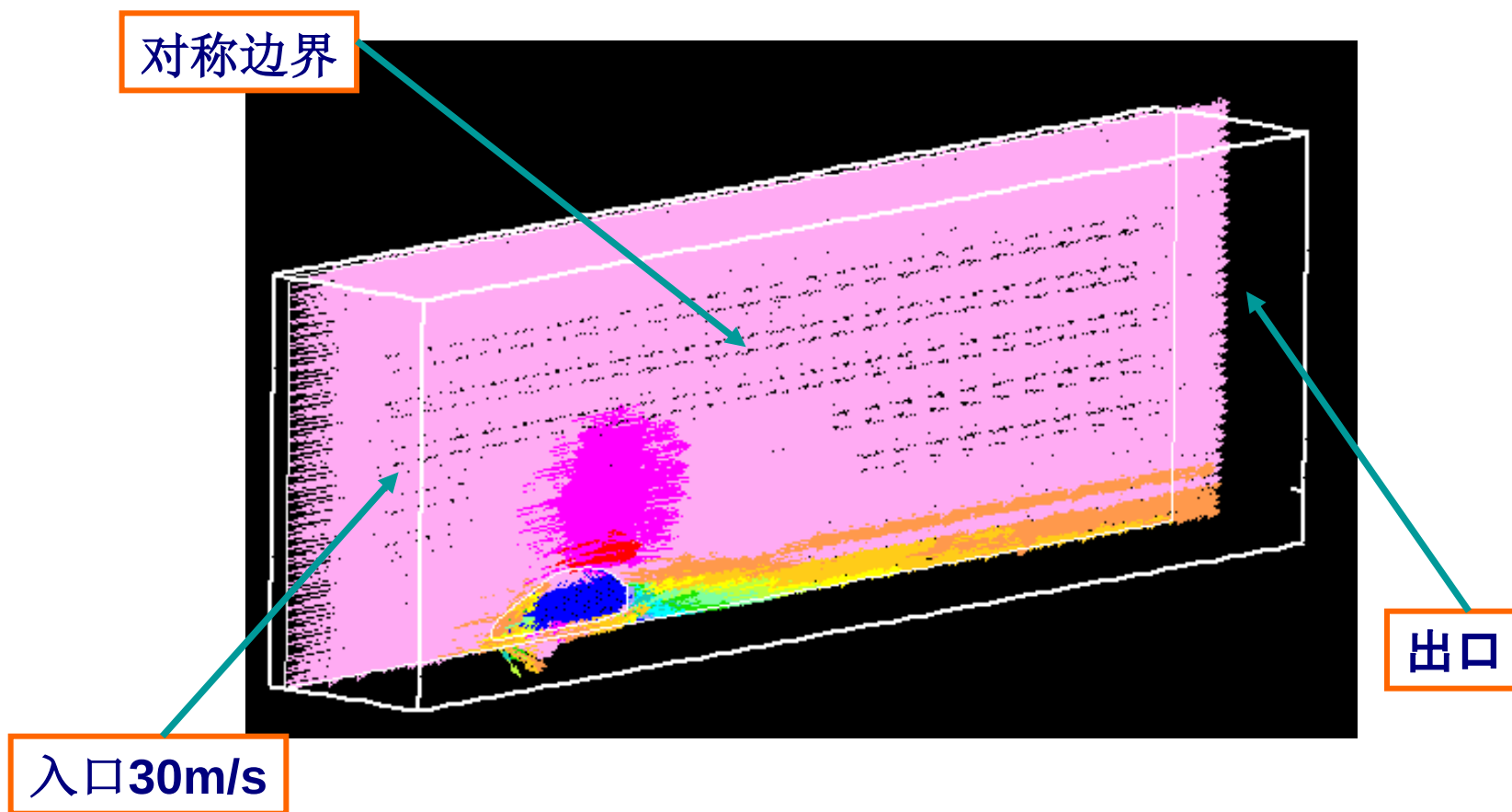


■ dv4对应车体中部和尾部长度的比例



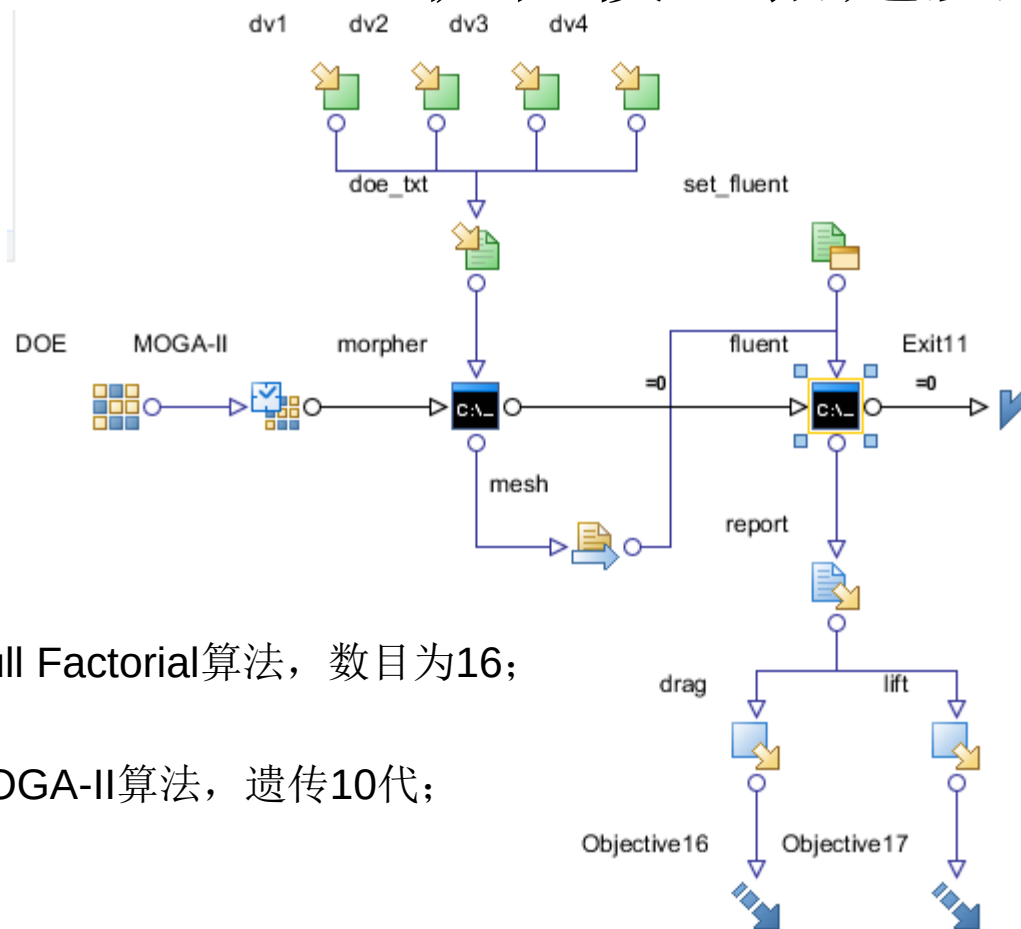
Fluent与modeFRONTIER的耦合优化方案

■ Fluent计算模型及设置



Fluent与modeFRONTIER的耦合优化方案

■ modeFRONTIER优化模型搭建及设置

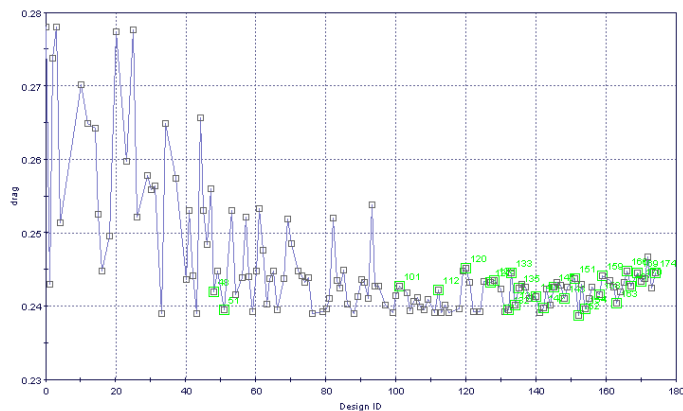


■ DOE算法采用Full Factorial算法，数目为16；

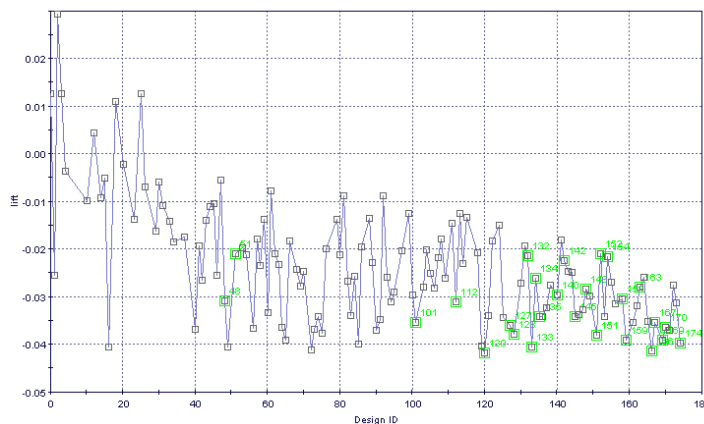
■ 优化算法采用MOGA-II算法，遗传10代；

Fluent与modeFRONTIER的耦合优化方案

■ 优化结果

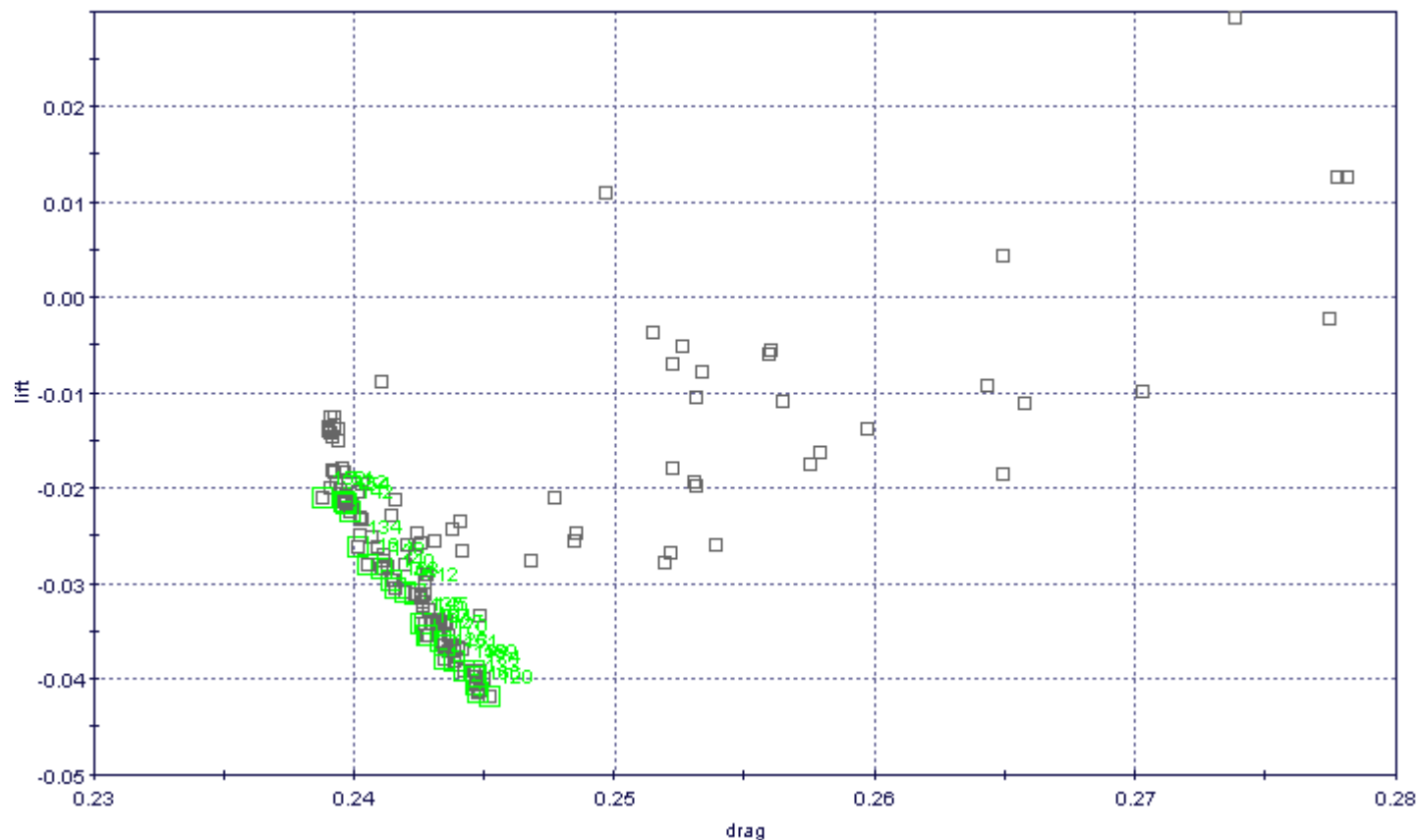


■ 阻力系数历史曲线



■ 升力系数历史曲线

Fluent与modeFRONTIER的耦合优化方案



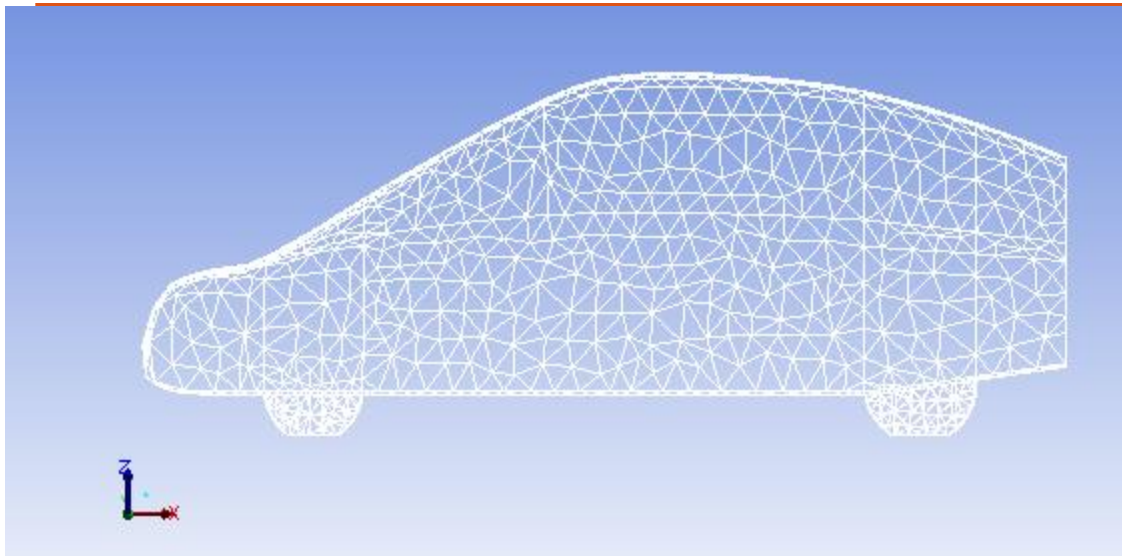
■ 图中绿色标注的为Pareto前沿解

Fluent与modeFRONTIER的耦合优化方案

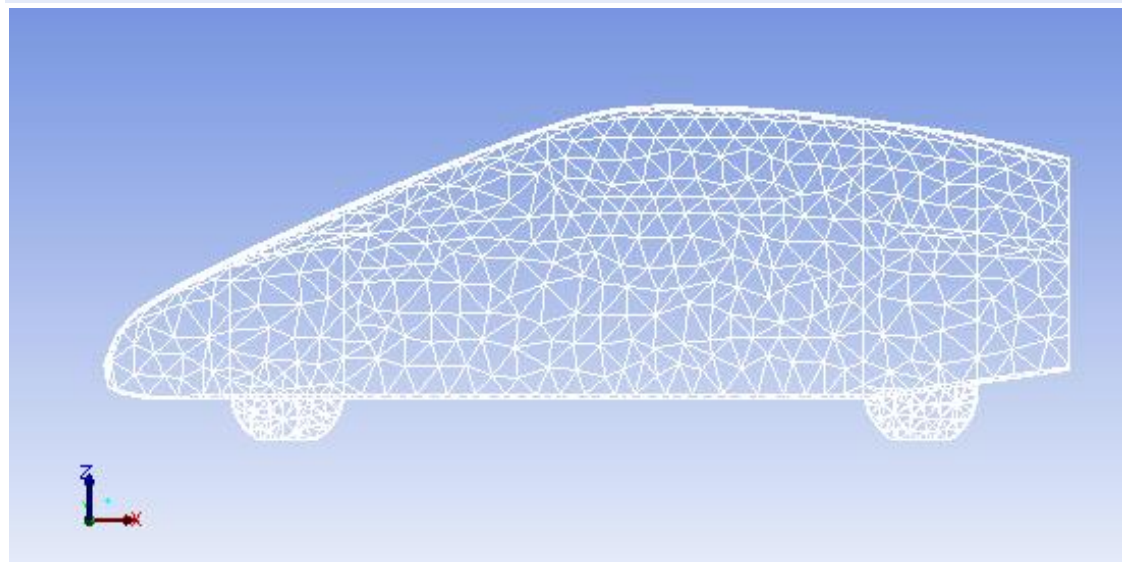
■ 优化解与原始方案的相应数据:

	dv1	dv2	dv3	dv4	阻力系数	升力系数
原始方案	0.04	0.03	-0.03	-0.05	0.27810	0.01258
优化解1	0	0	0	-0.030013	0.23877	-0.020889
优化解2	0	0	-0.011221	-0.022285	0.24048	-0.027991
优化解3	0.0001268	0	-0.029775	-0.014517	0.24348	-0.037758

Fluent与modeFRONTIER的耦合优化方案



■ 原始外形



■ 优化外形

目录

- 空气动力学重要性
- 基于Fluent的最佳实践
- 优化方案
 - 1.Adjoint Solver优化方案
 - 2.Fluent与modeFRONTIER的耦合优化方案
- 总结

总结

- 在空气动力学及优化领域，ANSYS Fluent具有大量的最佳实践和成功案例，可以帮助用户获得高品质的仿真结果。
- ANSYS最新版本R16极大提升了易用性，并保持一贯的高质量网格、丰富的差分格式及求解格式可供用户选择。Adjoint Solver及其内部自带的网格变形功能可以快速进行模型优化。
- IDAJ结合自身实践，提供ANSYS Fluent 集成 modeFRONTIER 平台级优化方案，可以在外造型参数化阶段进行多目标优化。

谢谢大家！欢迎提问~

技术支持邮箱: support@idaj.cn

艾迪捷信息科技(上海)有限公司 北京

地址: 北京市朝阳区光华路甲14号诺安基金大厦1601室, 100020

电话: 010-65881497/98

传真: 010-65881499

网址: www.idaj.cn

技术支持邮箱: support@idaj.cn

艾迪捷信息科技(上海)有限公司 上海

地址: 上海市浦东新区张杨路620号中融恒瑞国际大厦东楼2001室 200120

电话: 021-50588290/91

传真: 021-50588292