

新一代计算流体力学分析工具XFlow

2013 IDAJ中国区用户年会

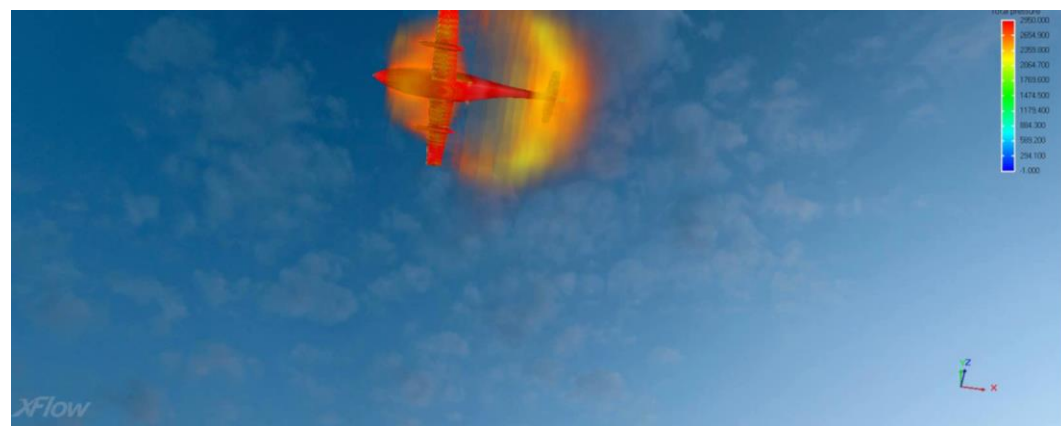
2013.11.13

IDAJ-China 技术部

唐连伟

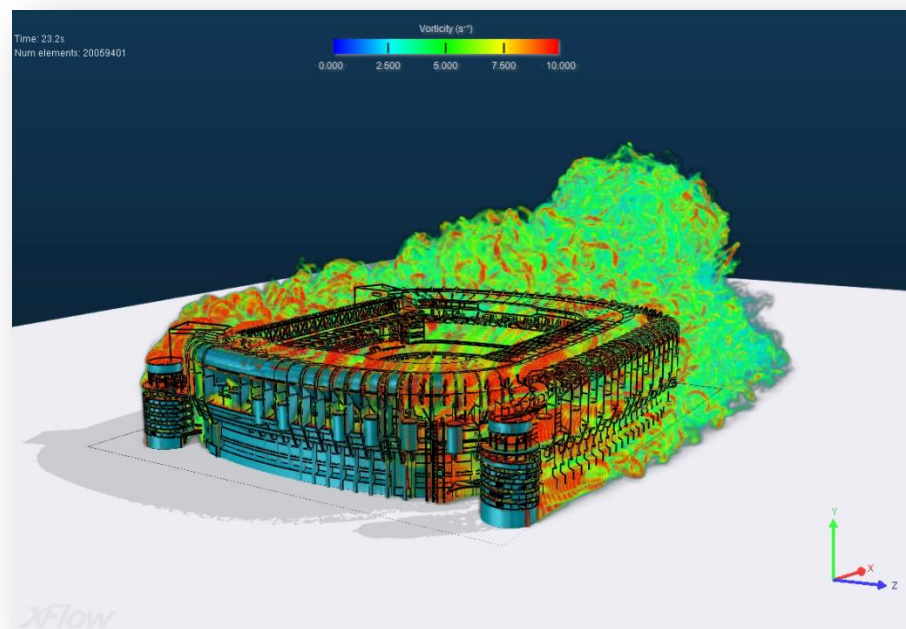
提纲

- 开发商介绍
- XFlow的创新技术
- 新一代的数值方法
- 应用优势
 - 空气动力学及噪声
 - 自由表面及多相流
- 开发计划



提纲

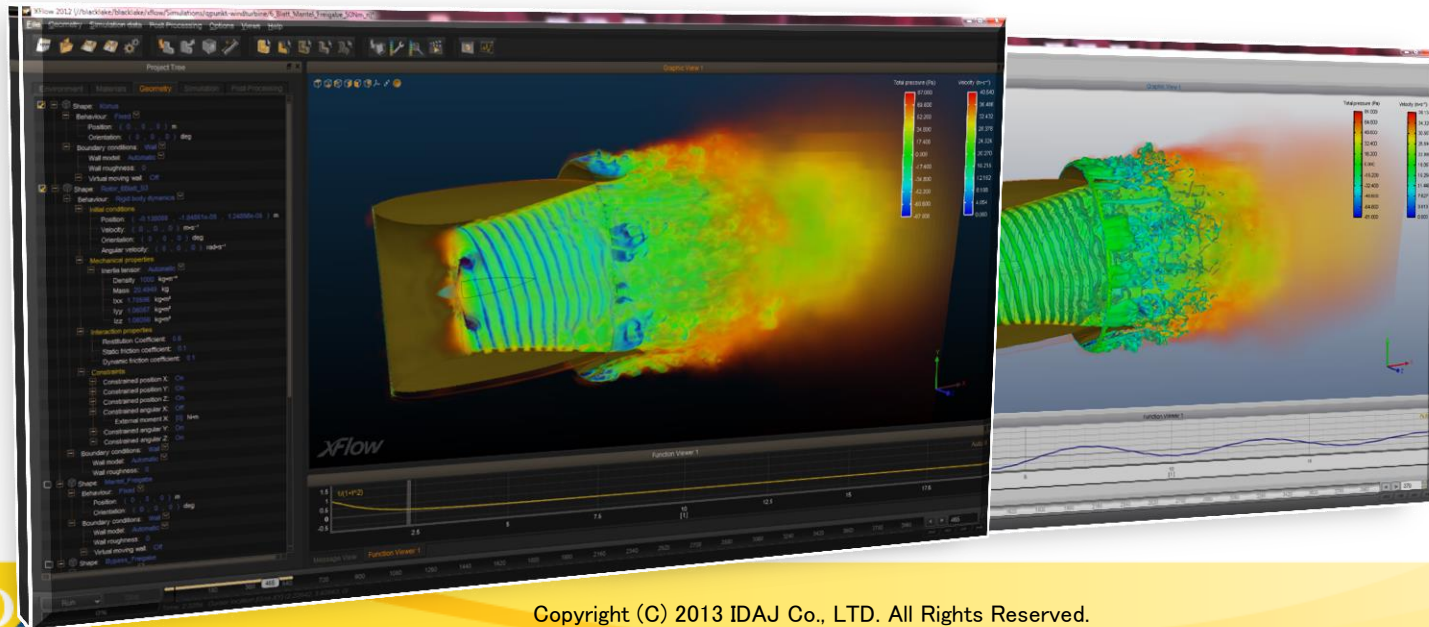
- 开发商介绍
- XFlow的创新技术
- 新一代的数值方法
- 应用优势
 - 空气动力学及噪声
 - 自由表面及多相流
- 开发计划



伯纳乌体育场风环境仿真

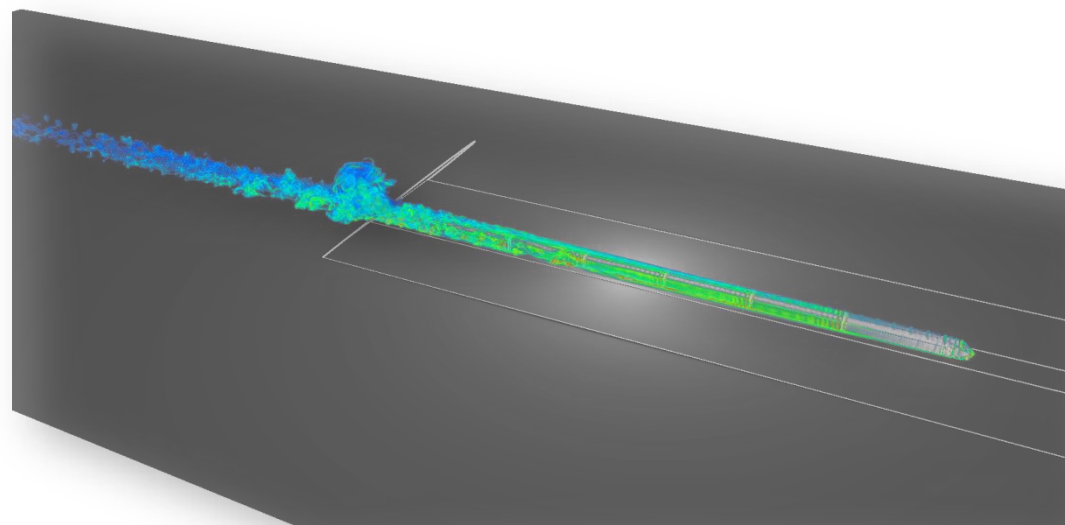
开发商介绍

- XFlow Technologies™ 隶属于Next Limit Technologies™ 公司，位于西班牙的马德里。旨在提供面向未来的采用创新技术的专业CFD仿真产品，专门针对复杂工程问题，帮助用户高效和精确的获得仿真结果。
- 公司拥有在物理、数学、计算机图形学、工程和可视化方面背景的多学科团队。



提纲

- 开发商介绍
- **XFlow**的创新技术
- 新一代的数值方法
- 应用优势
 - 空气动力学及噪声
 - 自由表面及多相流
- 开发计划



TGV高铁过隧道仿真

XFlow的创新技术

■ 传统CFD面临的挑战

■ 挑战一：空间体网格化的“瓶颈”

■ 复杂几何的失真：

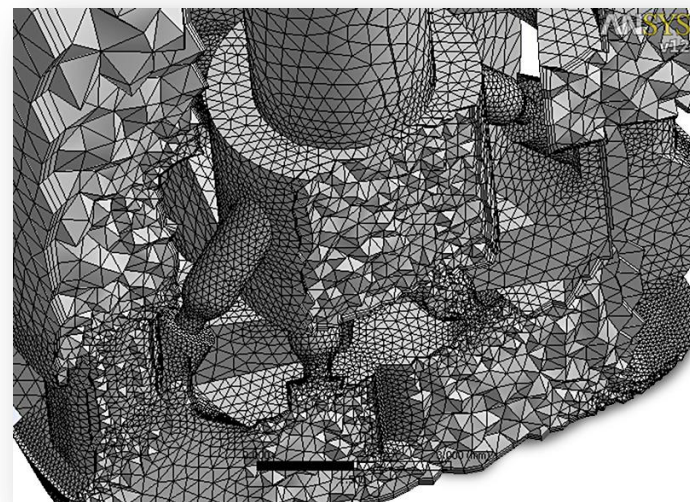
- 面对工程案例中经常遇到的复杂几何不得不牺牲精度，去除部分特征

■ 体网格质量：

- 体网格质量会影响数值计算的收敛性，工程师不得不花费大量的时间用于提升或改善体网格质量

■ 运动网格：

- 在处理计算域拓扑改变，运动边界以及流体-结构耦合等复杂问题时遭遇极大不变



XFlow的创新技术

■ 传统CFD面临的挑战

- 挑战二：结果的可靠性取决于多种因素的组合
 - 需要工程师具备大量的仿真经验来建立计算模型

Mesh

Structured
Unstructured
Hybrid
Elements
Strategy
Wake

Turbulence

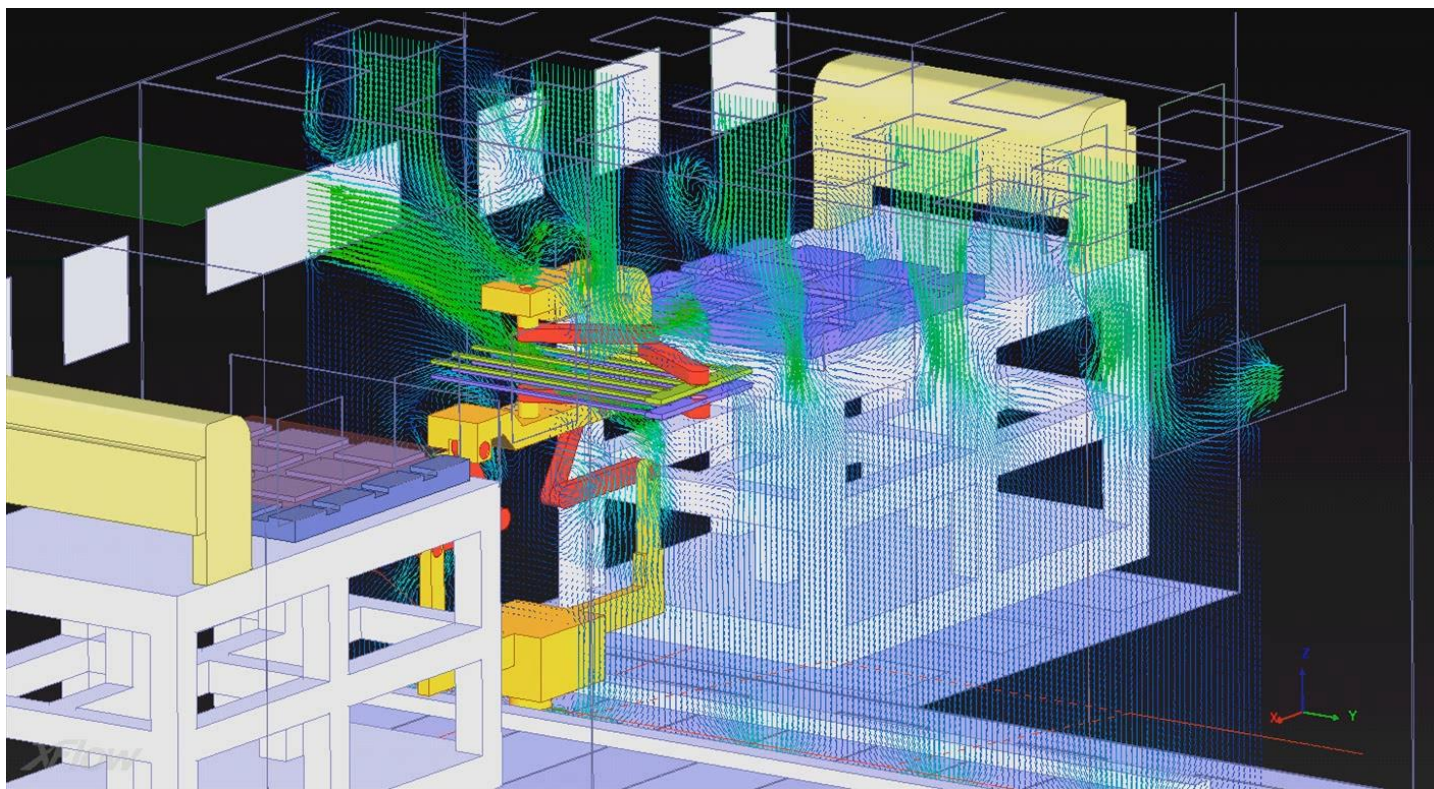
RANS (Lo/Hi Re)
DES
LES*
Compliance with
Mesh

Numerical scheme

Eulerian/ALE
Convection
scheme
Stabilization

XFlow的创新技术

- XFlow的“无网格化”特点：
 - 没有体网格质量要求
 - 可以模拟物体在流场中的复杂运动



XFlow的创新技术

- XFlow的“本质计算”特色：
 - 从物理问题本质出发求解，最简化用户输入。
 - 用户不必考虑算法/模型等参数的设置

Discretization scheme

离散格式

Particle based approach
基于粒子的方法

Adaptive Wake refinement
自适应尾迹加密

Turbulence 湍流模型

State of the art
WMLES

先进的湍流模型

Generalized law
of the Wall
通用壁面定律

Numerical scheme

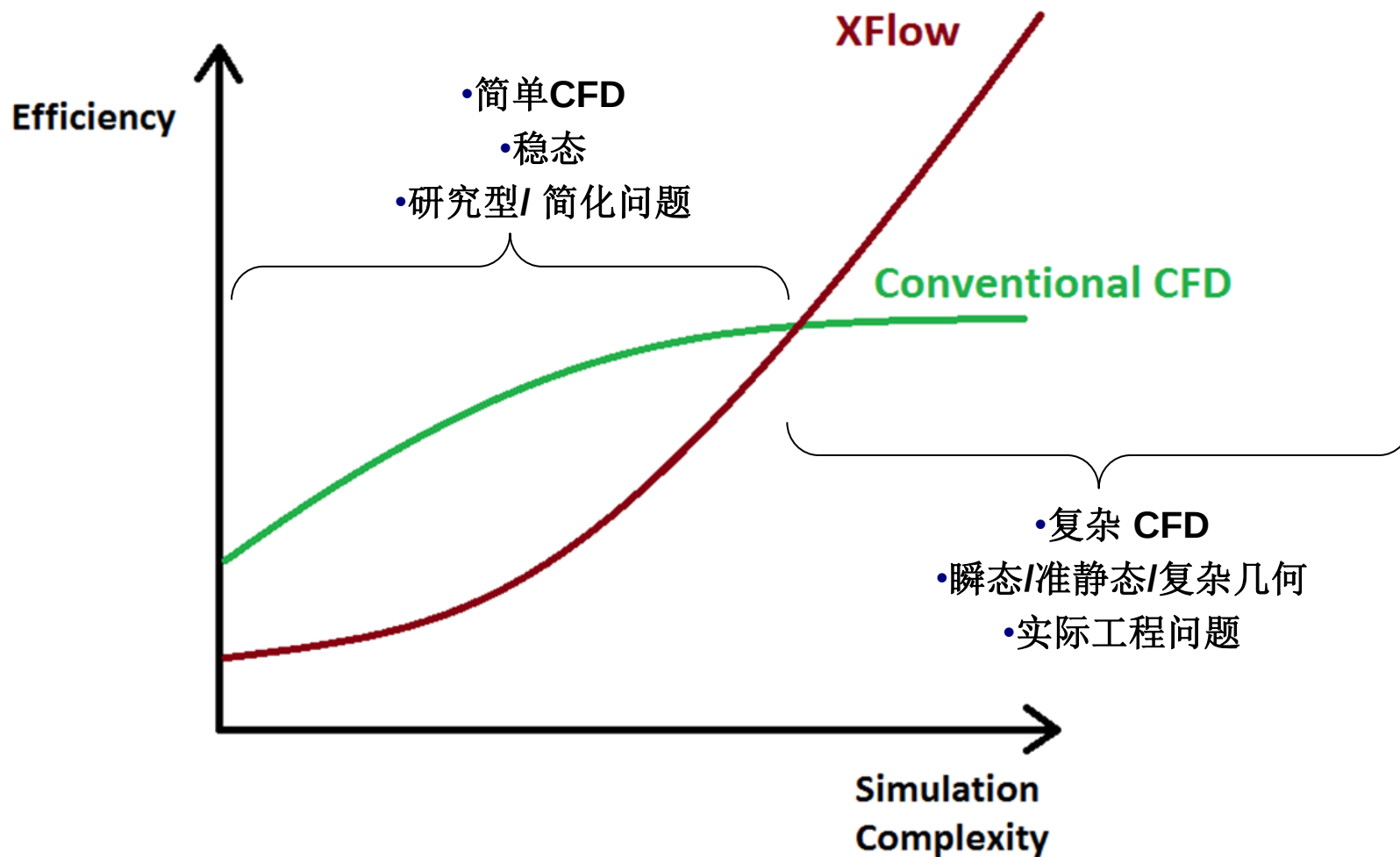
数值格式

Lagrangian formulation
拉格朗日算法

Low numerical viscosity
低数值耗散

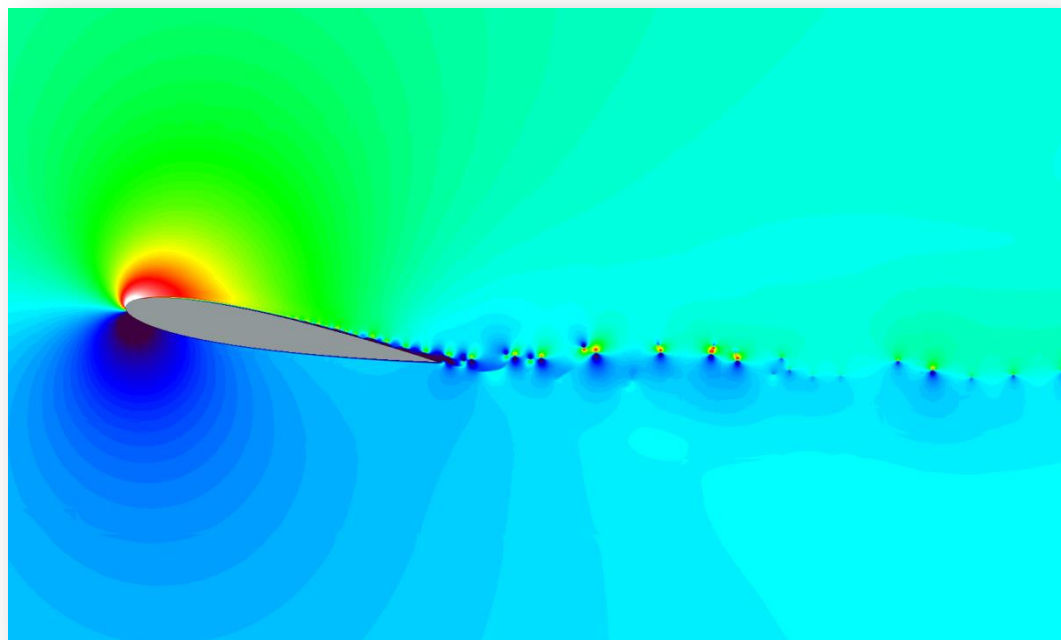
Minimize algorithm parameters
减少算法参数

XFlow的创新技术



提纲

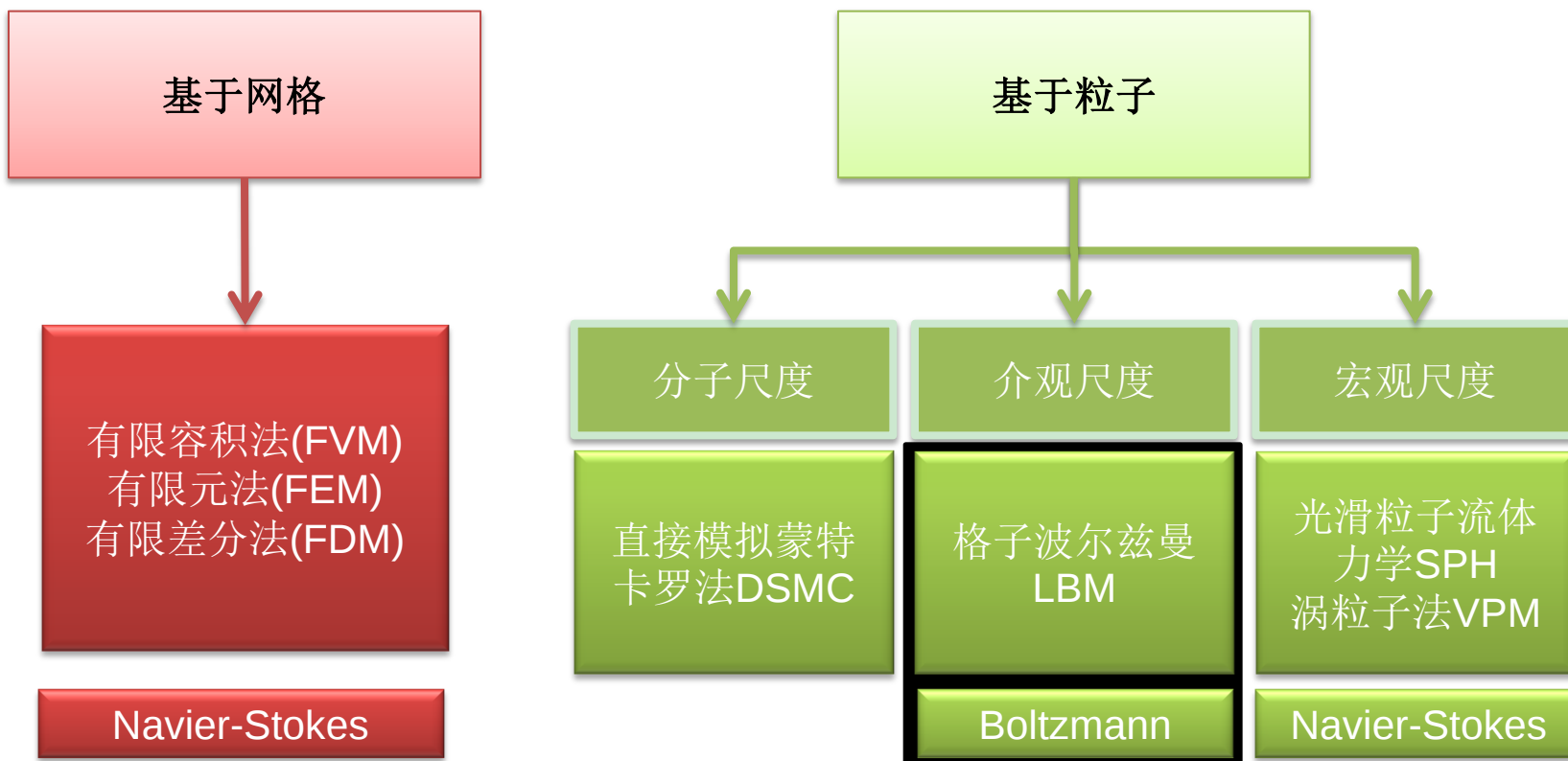
- 开发商介绍
- XFlow的创新技术
- 新一代的数值方法
- 应用优势
 - 空气动力学及噪声
 - 自由表面及多相流
- 开发计划



翼型外气动仿真

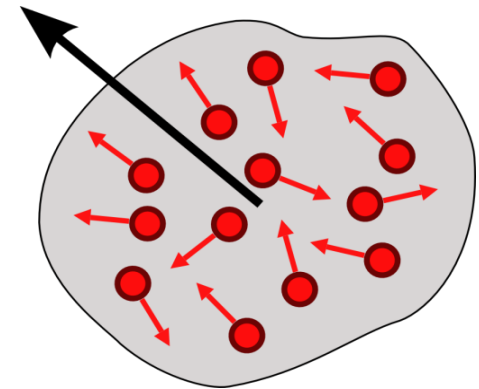
新一代的数值方法

■ 离散方法



新一代的数值方法

- 格子-波尔兹曼方法 (Lattice-Boltzmann Method)
 - 求解波尔兹曼方程
 - 对介观尺度流体特征建模
 - 基于气体动理论
 - 以统计学的方法描述大量微观分子的行为，从而解释其宏观特征
(*L. Boltzmann, J.C. Maxwell, s. XIX*)



新一代的数值方法

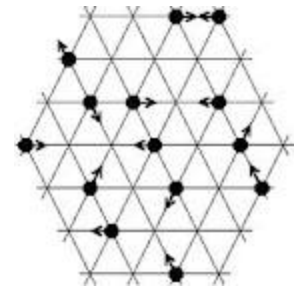
- 基于波尔兹曼方程的最小动力学模型而发展出来的离散格式，能够可靠的替代常规的CFD技术

格子气自动机(LGA)

$$n_i(\mathbf{r} + \mathbf{e}_i, t + dt) = n_i(\mathbf{r}, t) + \Omega_i(n_1, \dots, n_b)$$

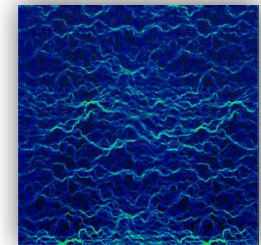
$$\rho = \frac{1}{b} \sum_{i=1}^b n_i$$

$$\rho \mathbf{v} = \frac{1}{b} \sum_{i=1}^b n_i \mathbf{e}_i$$



格子-波尔兹曼方法(LBM)

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} + \mathbf{e}_i \cdot \nabla f_i = \Omega_i, i = 1, \dots, b$$



新一代的数值方法

- XFlow采用的碰撞因子基于多重松弛时间格式
 - 适合处理可压缩流动计算

单松弛时间格式
(SRT)

$$\Omega_i^{\text{BGK}} = \frac{1}{\tau} (f_i^{\text{eq}} - f_i)$$

多重松弛时间格式
(MRT)

$$\Omega_i^{\text{MRT}} = M_{ij}^{-1} \hat{S}_{ij} (m_i^{\text{eq}} - m_i)$$

新一代的数值方法

- 不同于标准MRT，散射算子的计算在**中心矩**空间内实施；
 - 无数值粘度！
 - 可以计算声波！

单松弛时间格式
(SRT)

$$\Omega_i^{\text{BGK}} = \frac{1}{\tau} (f_i^{\text{eq}} - f_i)$$

多重松弛时间格式
(MRT)

$$\Omega_i^{\text{MRT}} = M_{ij}^{-1} \hat{S}_{ij} (m_i^{\text{eq}} - m_i)$$

原始矩
(Raw moments)

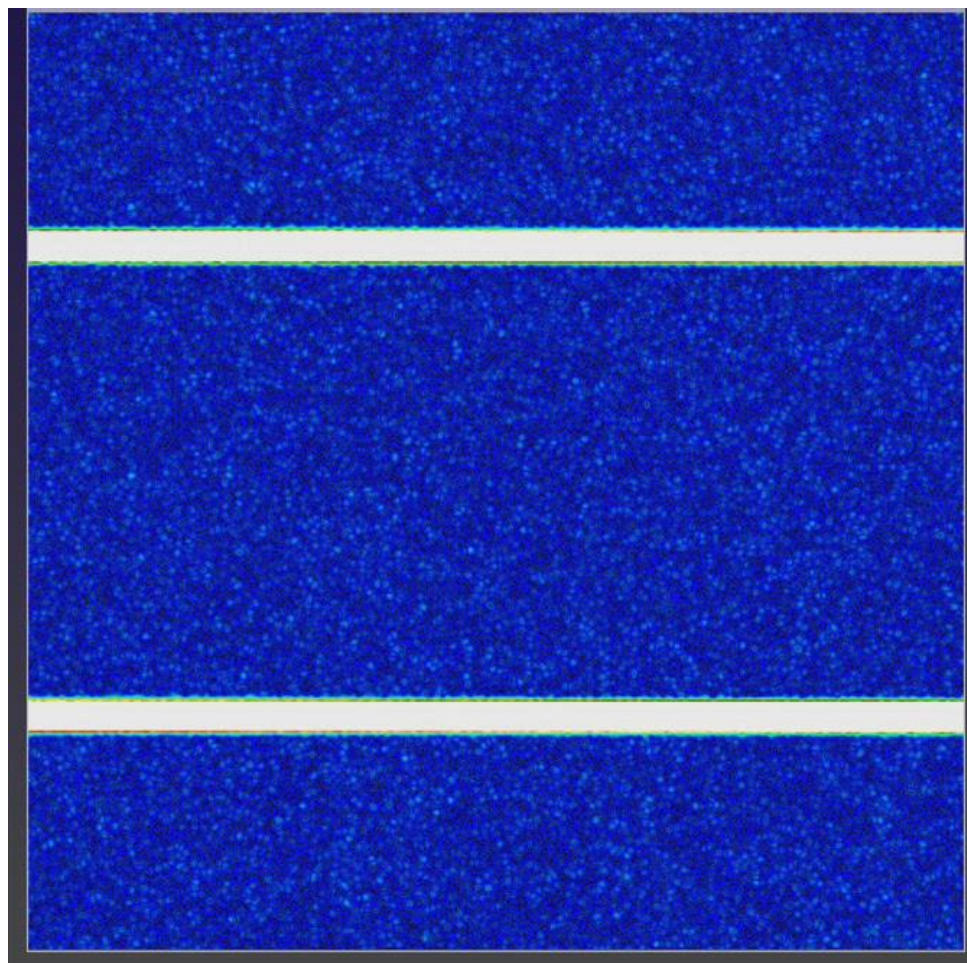
$$\mu x^k y^l z^m = \sum_i^N f_i e_{ix}^k e_{iy}^l e_{iz}^m$$

中心矩
(Central moments)

$$\tilde{\mu} x^k y^l z^m = \sum_i^N f_i (e_{ix} - u_x)^k (e_{iy} - u_y)^l (e_{iz} - u_z)^m$$

新一代的数值方法

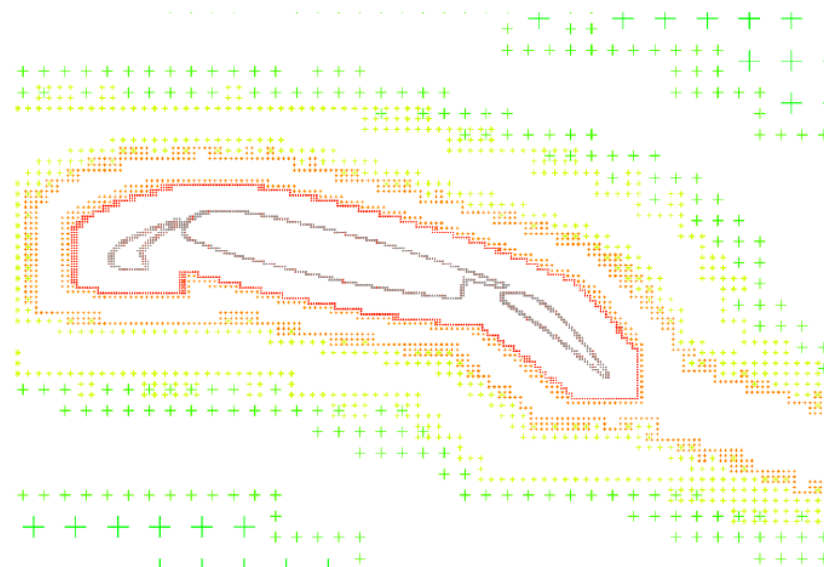
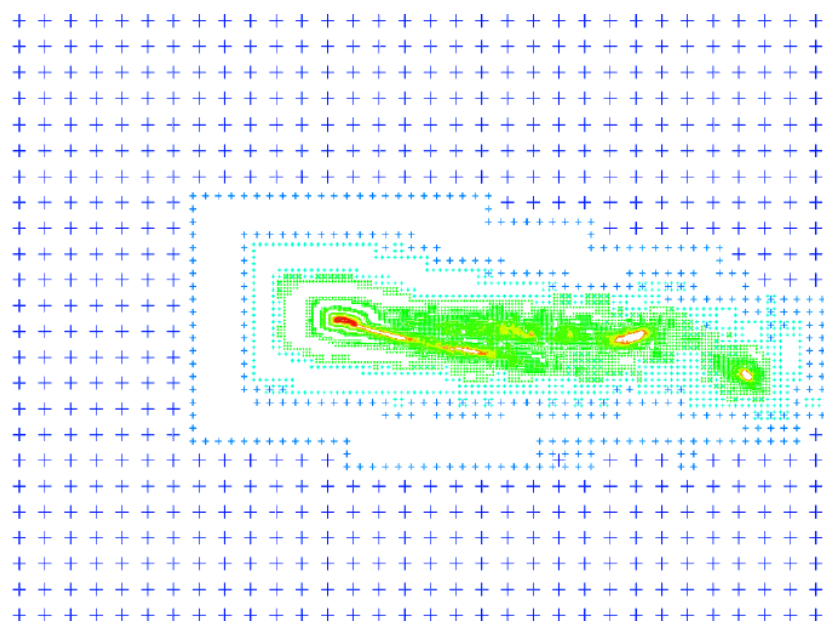
- CM-LBM是一种稳定的求解器，极低的数值粘度



新一代的数值方法

■ 空间离散方法

- 采用八叉树格子结构及自适应加密方法
- 每一格子层次上，时间-空间尺度均是上一层次的一半



新一代的数值方法

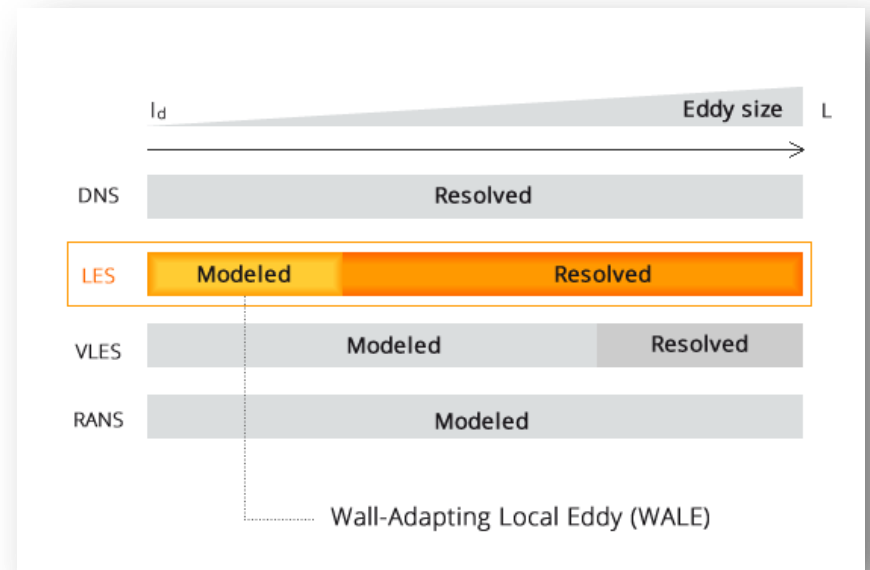
■ 湍流的模拟：

- 采用带壁面模型的大涡模拟(WMLES)方法计算湍流

■ 优势：

- 采用壁面适应局部涡粘性模型将流场内涡粘性与近壁特性很好地统一

$$\begin{aligned}\nu_t &= \Delta_f^2 \frac{(G_{\alpha\beta}^d G_{\alpha\beta}^d)^{3/2}}{(S_{\alpha\beta} S_{\alpha\beta})^{5/2} + (G_{\alpha\beta}^d G_{\alpha\beta}^d)^{5/4}} \\ S_{\alpha\beta} &= \frac{g_{\alpha\beta} + g_{\beta\alpha}}{2} \\ G_{\alpha\beta}^d &= \frac{1}{2}(g_{\alpha\beta}^2 + g_{\beta\alpha}^2) - \frac{1}{3}\delta_{\alpha\beta} g_{\gamma\gamma}^2 \\ g_{\alpha\beta} &= \frac{\partial u_\alpha}{\partial x_\beta}\end{aligned}$$

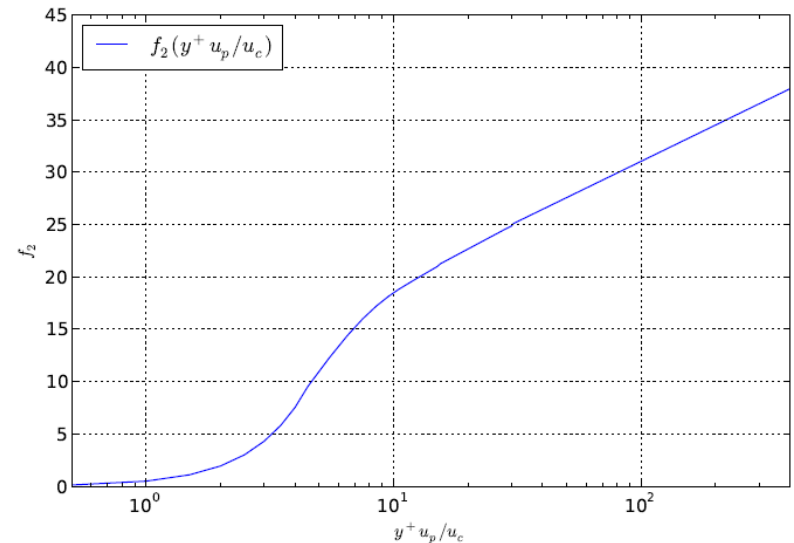
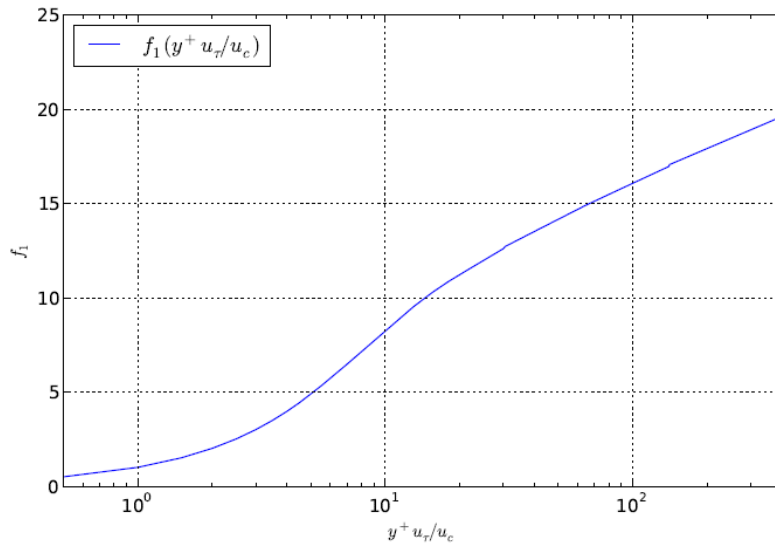


新一代的数值方法

- 壁面的处理：采用通用壁面法则来模拟边界层流动

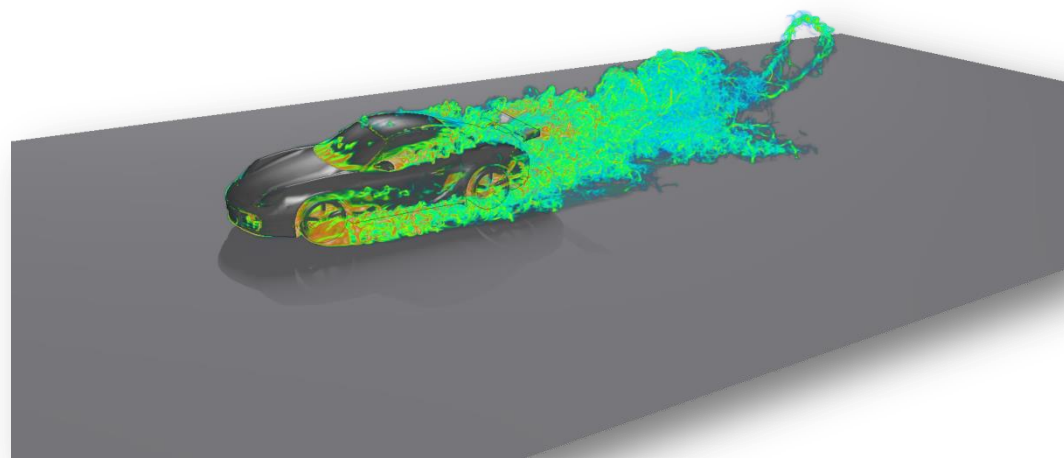
$$\begin{aligned} \frac{U}{u_c} &= \frac{U_1 + U_2}{u_c} = \frac{u_\tau}{u_c} \frac{U_1}{u_\tau} + \frac{u_p}{u_c} \frac{U_2}{u_p} \\ &= \frac{\tau_w}{\rho u_\tau^2} \frac{u_\tau}{u_c} f_1 \left(y^+ \frac{u_\tau}{u_c} \right) + \frac{dp_w/dx}{|dp_w/dx|} \frac{u_p}{u_c} f_2 \left(y^+ \frac{u_p}{u_c} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y^+ &= \frac{u_c y}{\nu} \\ u_c &= u_\tau + u_p \\ u_\tau &= \sqrt{|\tau_w|/\rho} \\ u_p &= \left(\frac{\nu}{\rho} \left| \frac{dp_w}{dx} \right| \right)^{1/3} . \end{aligned}$$



提纲

- 开发商介绍
- XFlow的创新技术
- 新一代的数值方法
- 应用优势
 - 空气动力学及噪声
 - 自由表面及多相流
- 开发计划



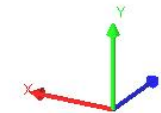
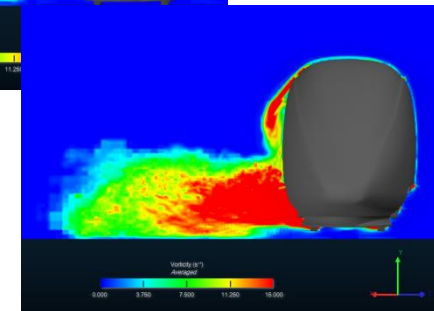
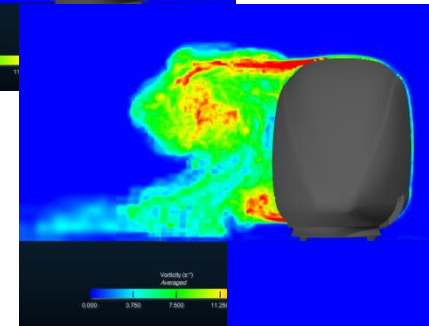
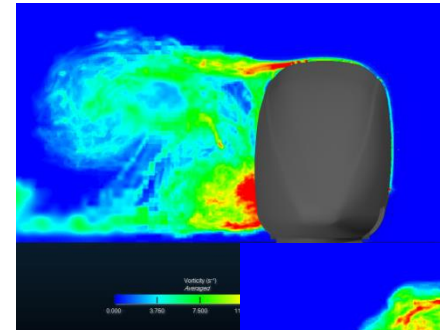
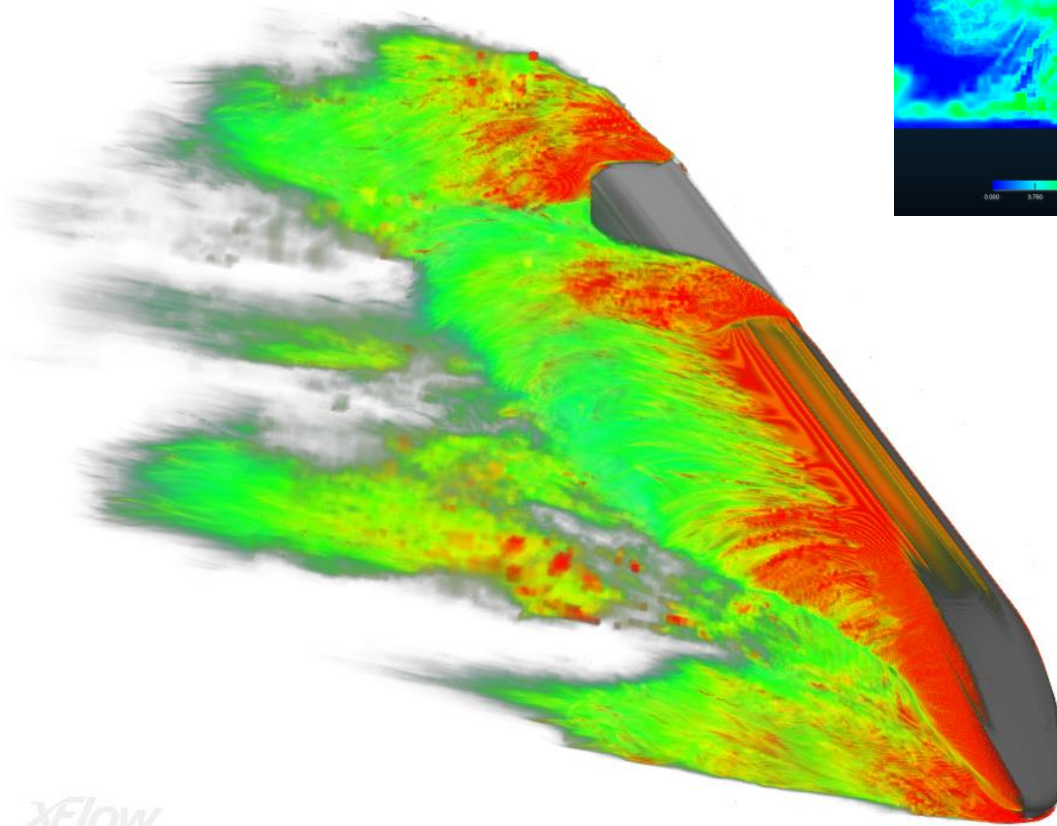
保时捷外气动仿真

Virtual Wind Tunnel

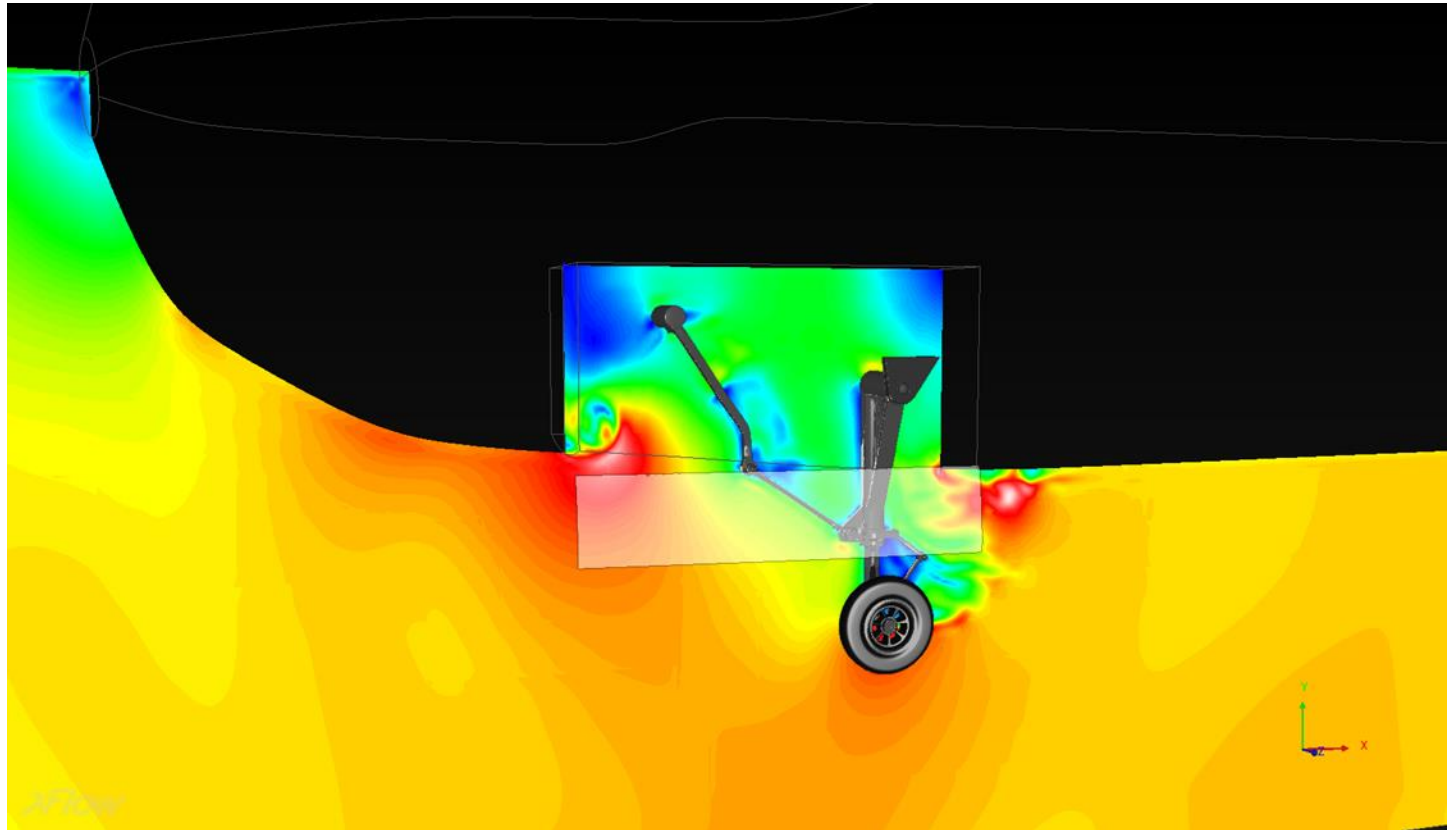
■ 自动设定虚拟风洞



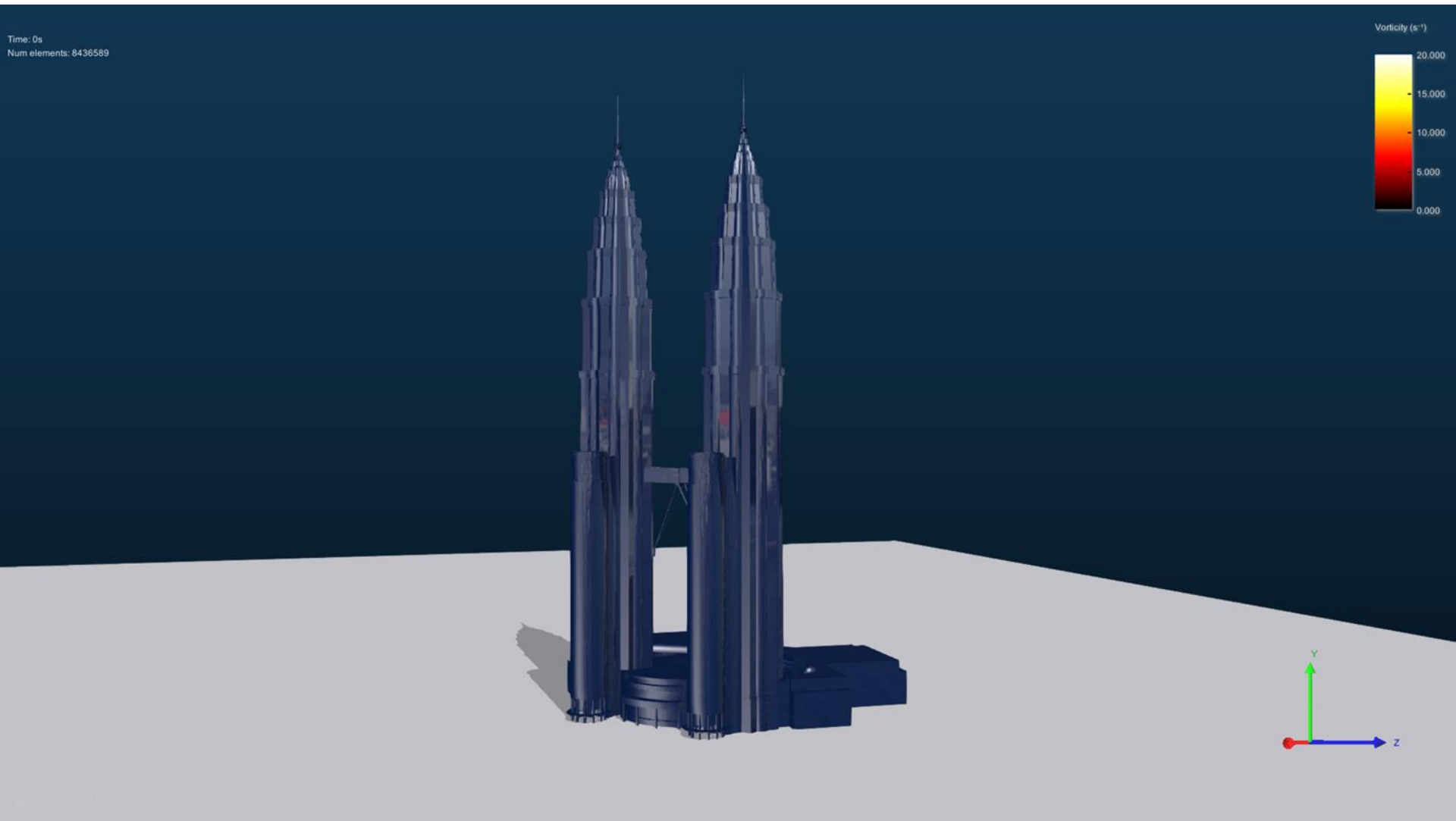
High Speed Train



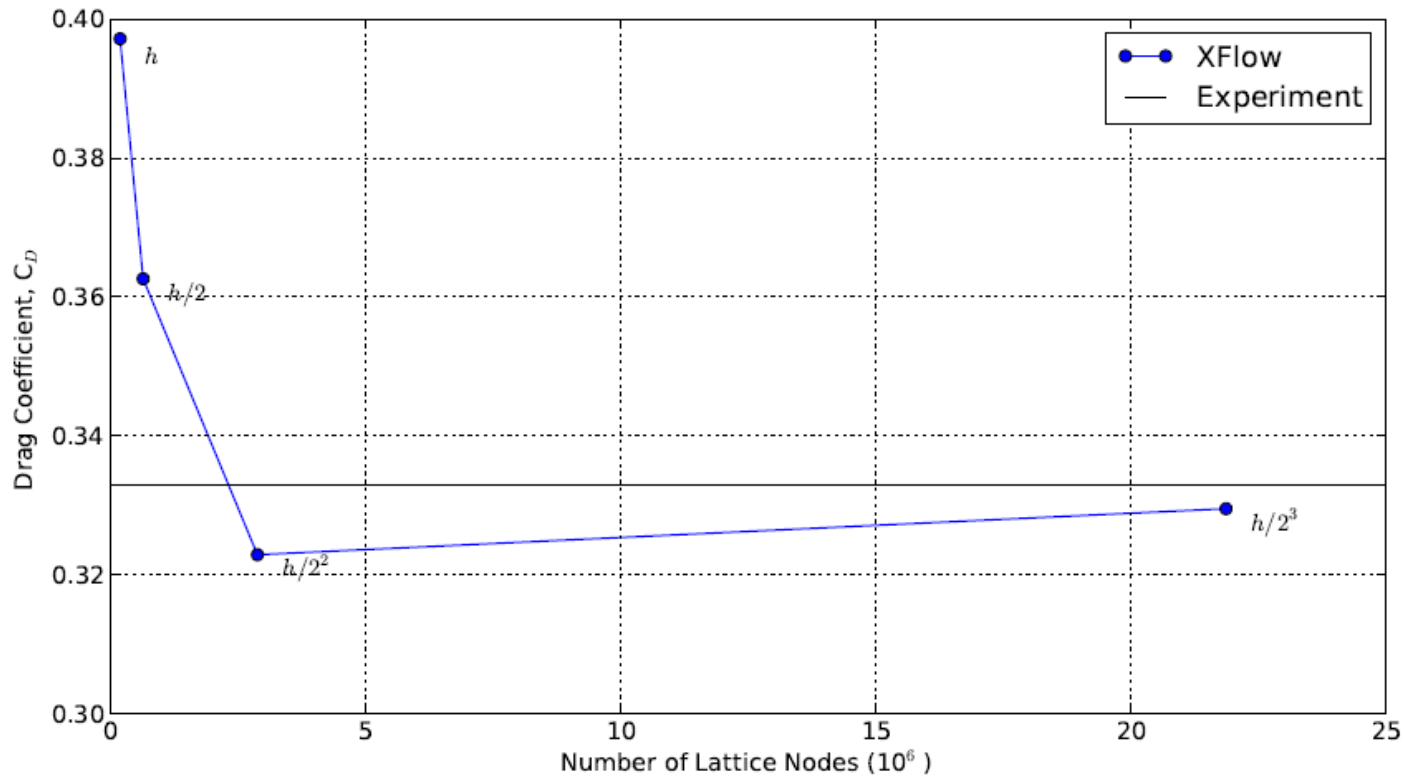
机轮起落运动



Petronas



NASA Trapezoidal Wing

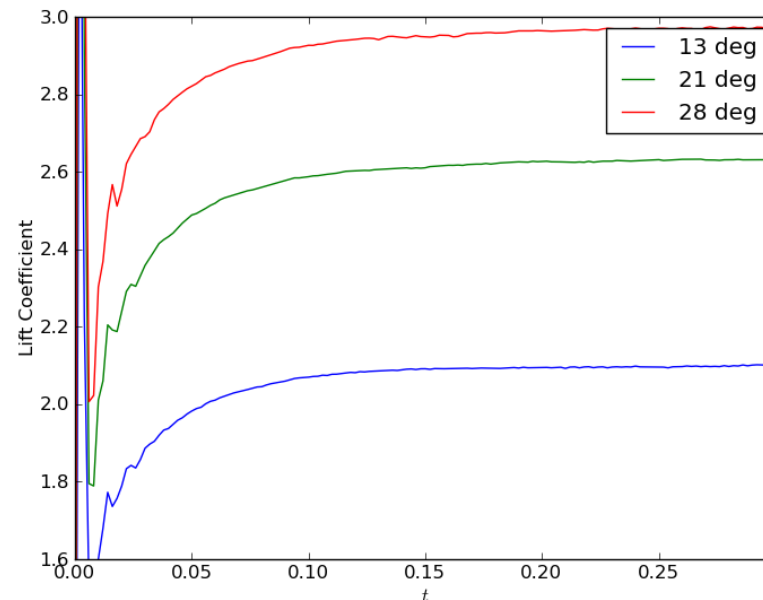


Drag coefficient against the number of lattice nodes for different resolutions at $\alpha = 13^\circ$

格子数量对计算结果影响分析

NASA Trapezoidal Wing

- 降低硬件配置需求：
 - 所有工作在12GB内存工作站
- 计算时间：
 - 采用8核计算36小时完成

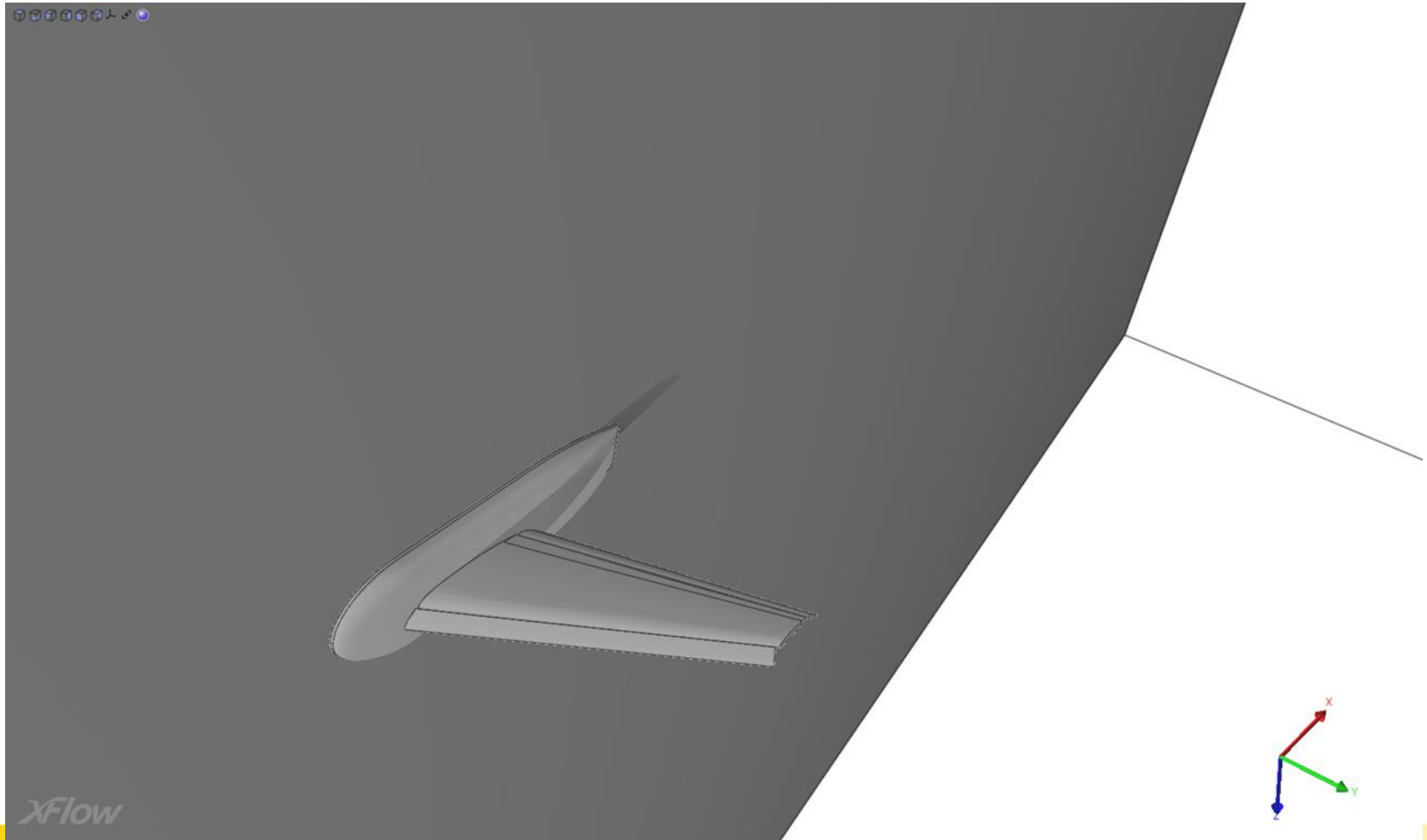


Resolutions used for the 1st High Lift Prediction Workshop

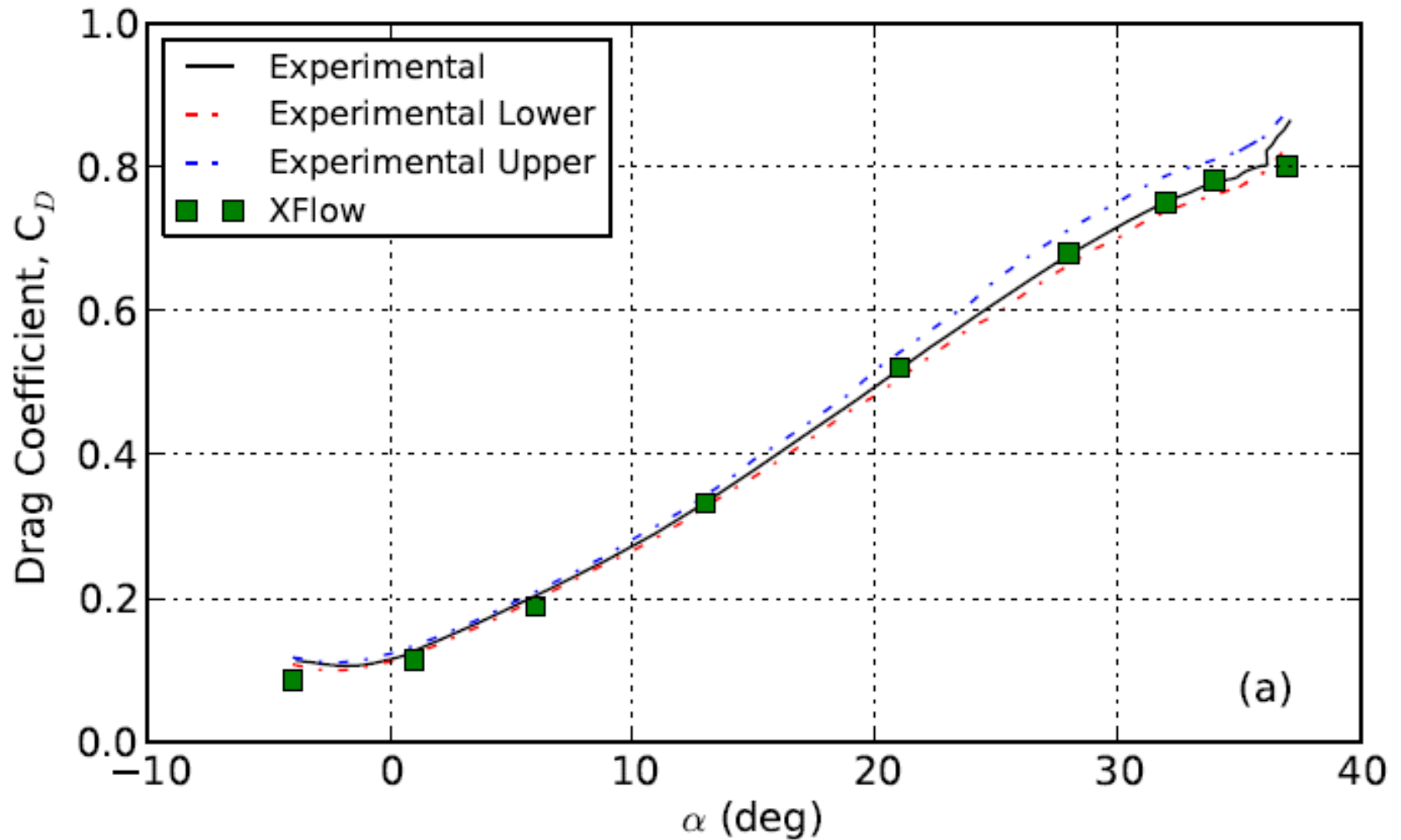
	Walls (m)	Wake (m)	Far Field (m)	Max. # of Particles	Angles
Resolution 1	0.005	0.01	1.28	25×10^6	$[-4^\circ; 32^\circ]$
Resolution 2	0.005	0.02	1.28	10×10^6	$[34^\circ; 37^\circ]$

NASA Trapezoidal Wing

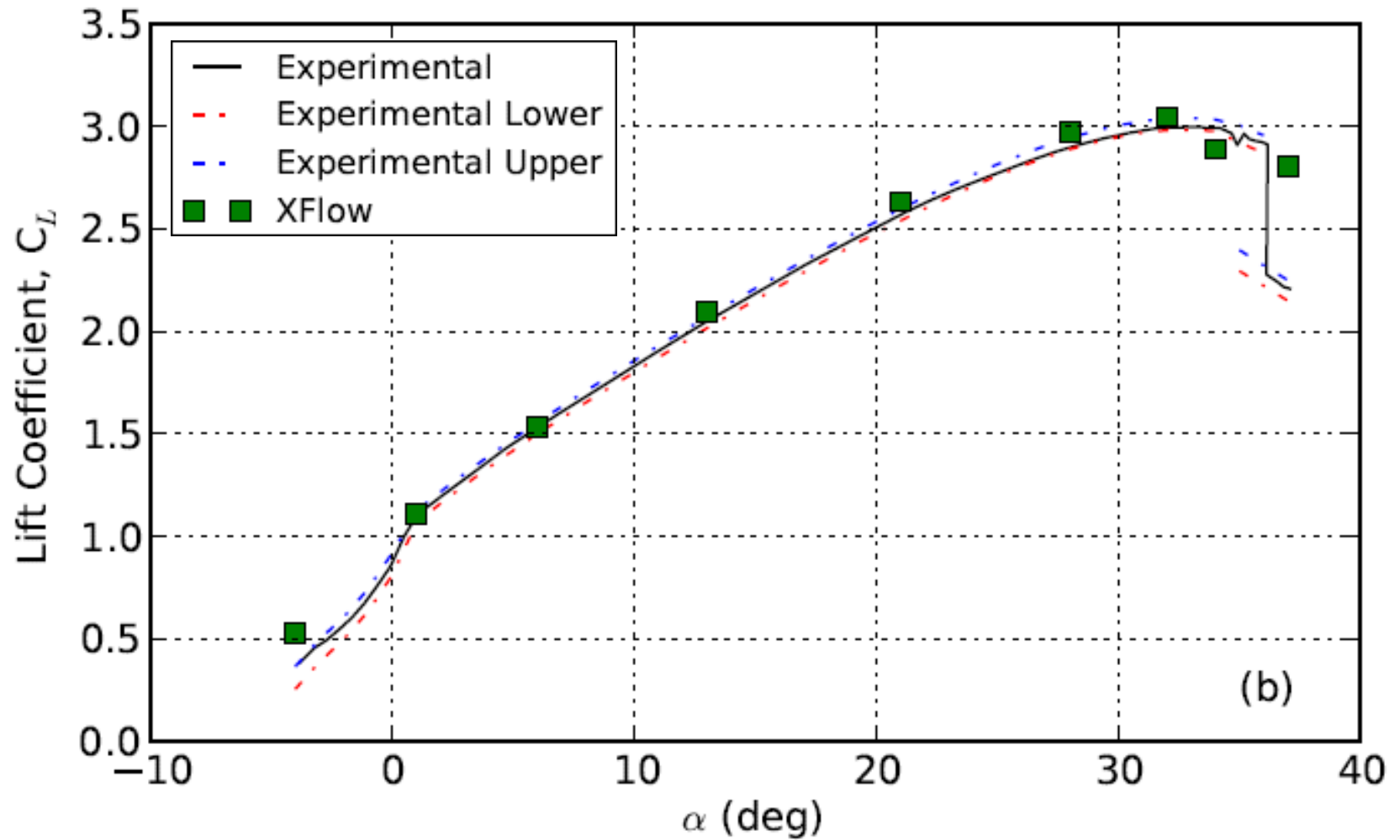
■ AoA = 13°



NASA Trapezoidal Wing



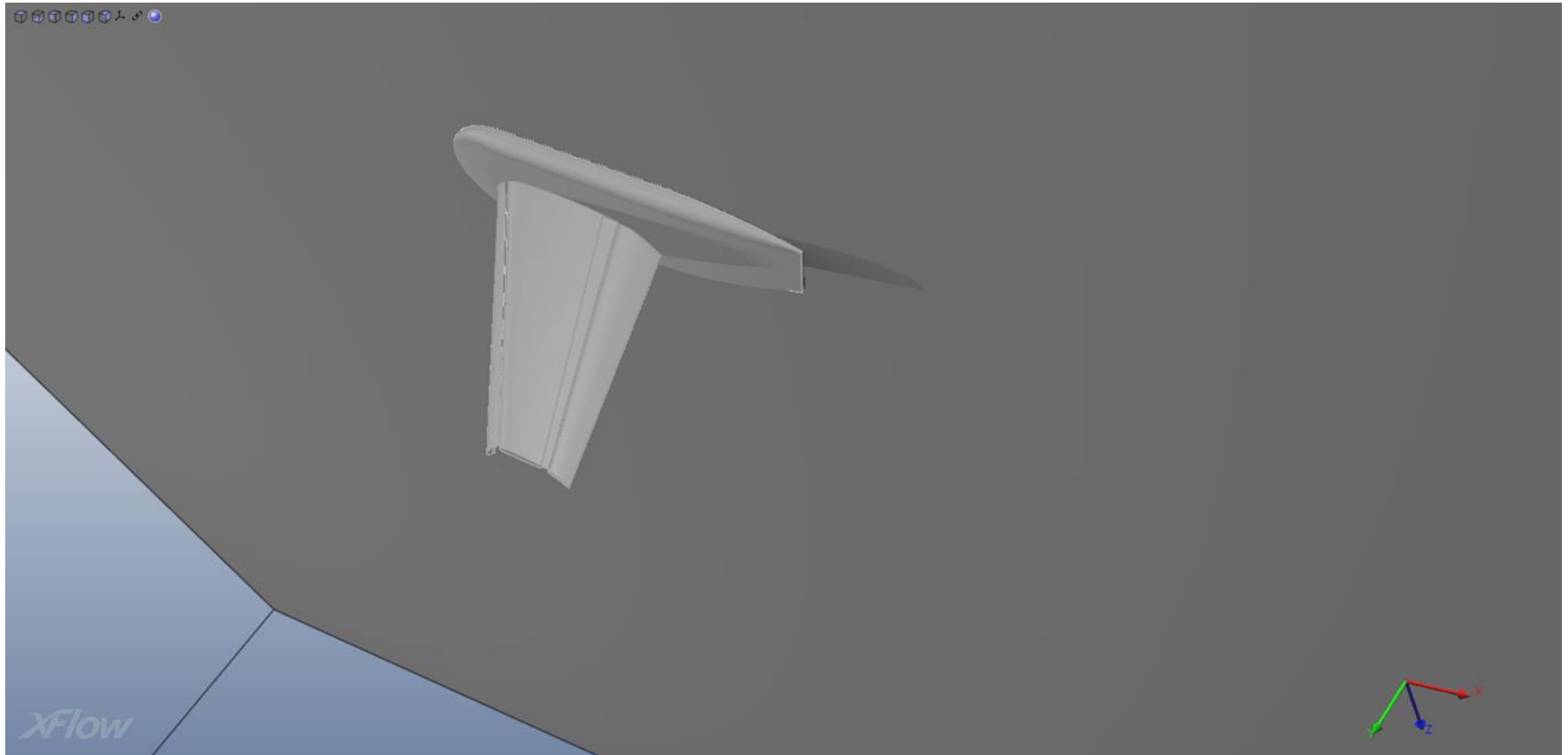
NASA Trapezoidal Wing



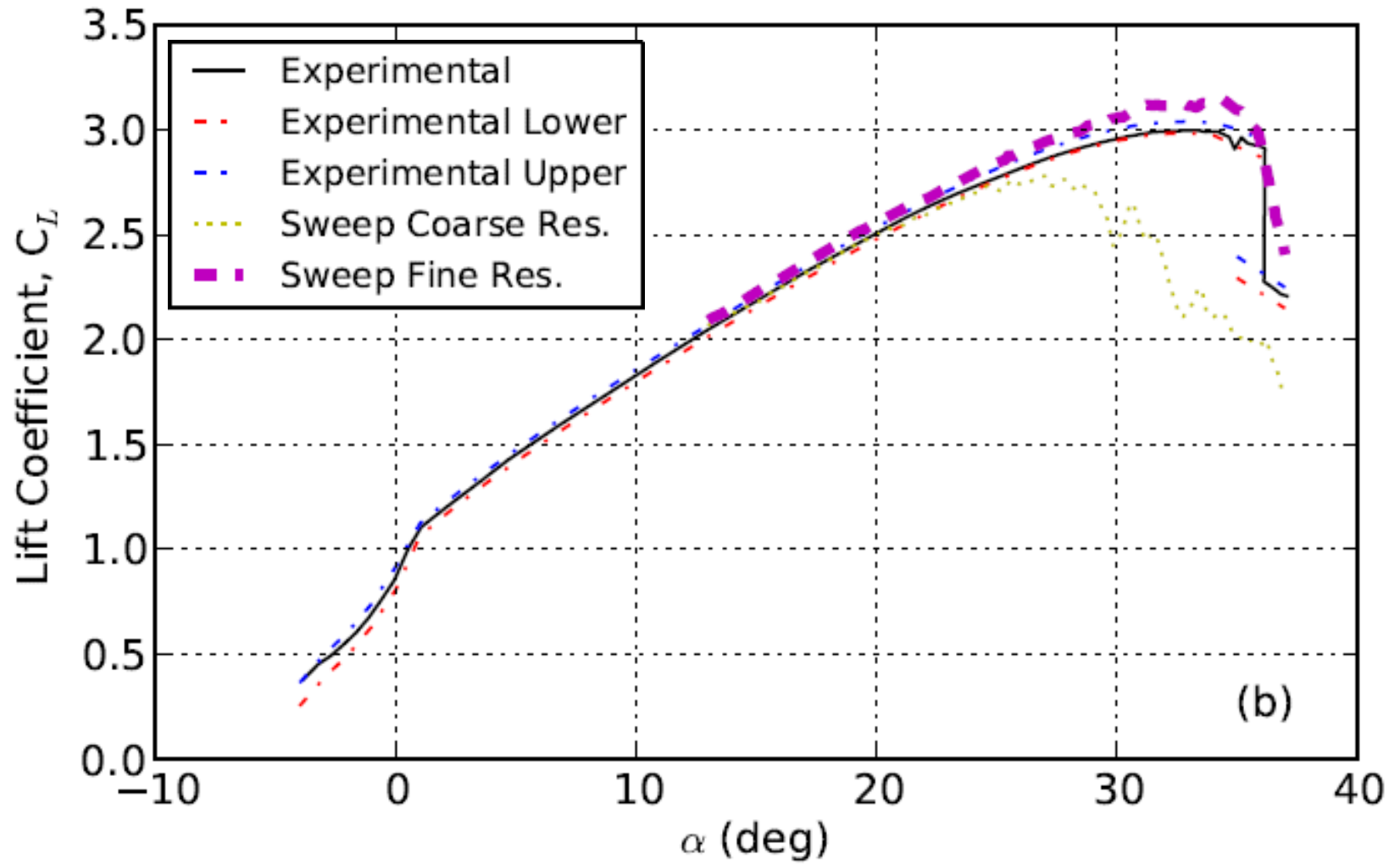
(b)

Polar Sweep

■ 从线性区到失速区的扫描

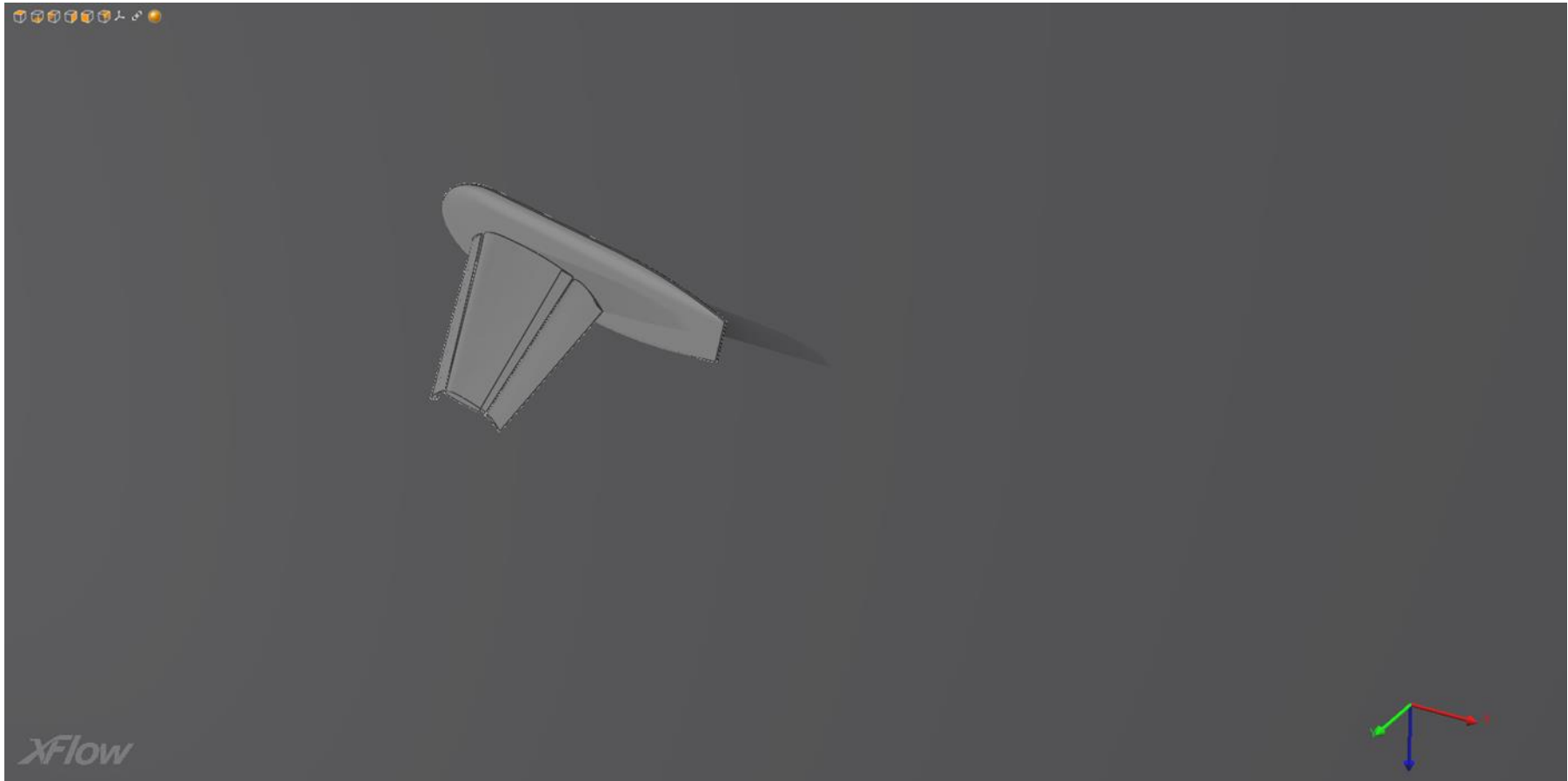


Polar Sweep

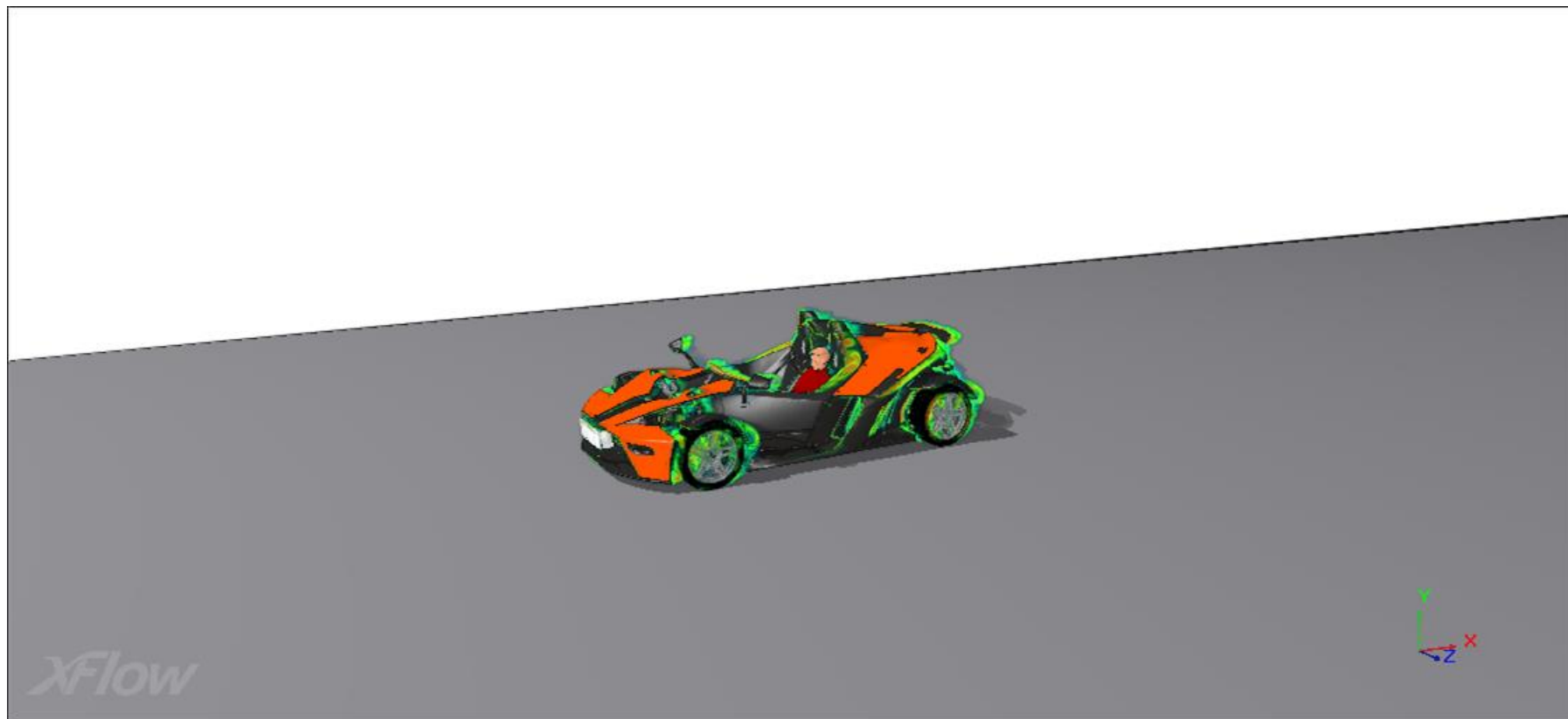


Stowing and Un-Stowing

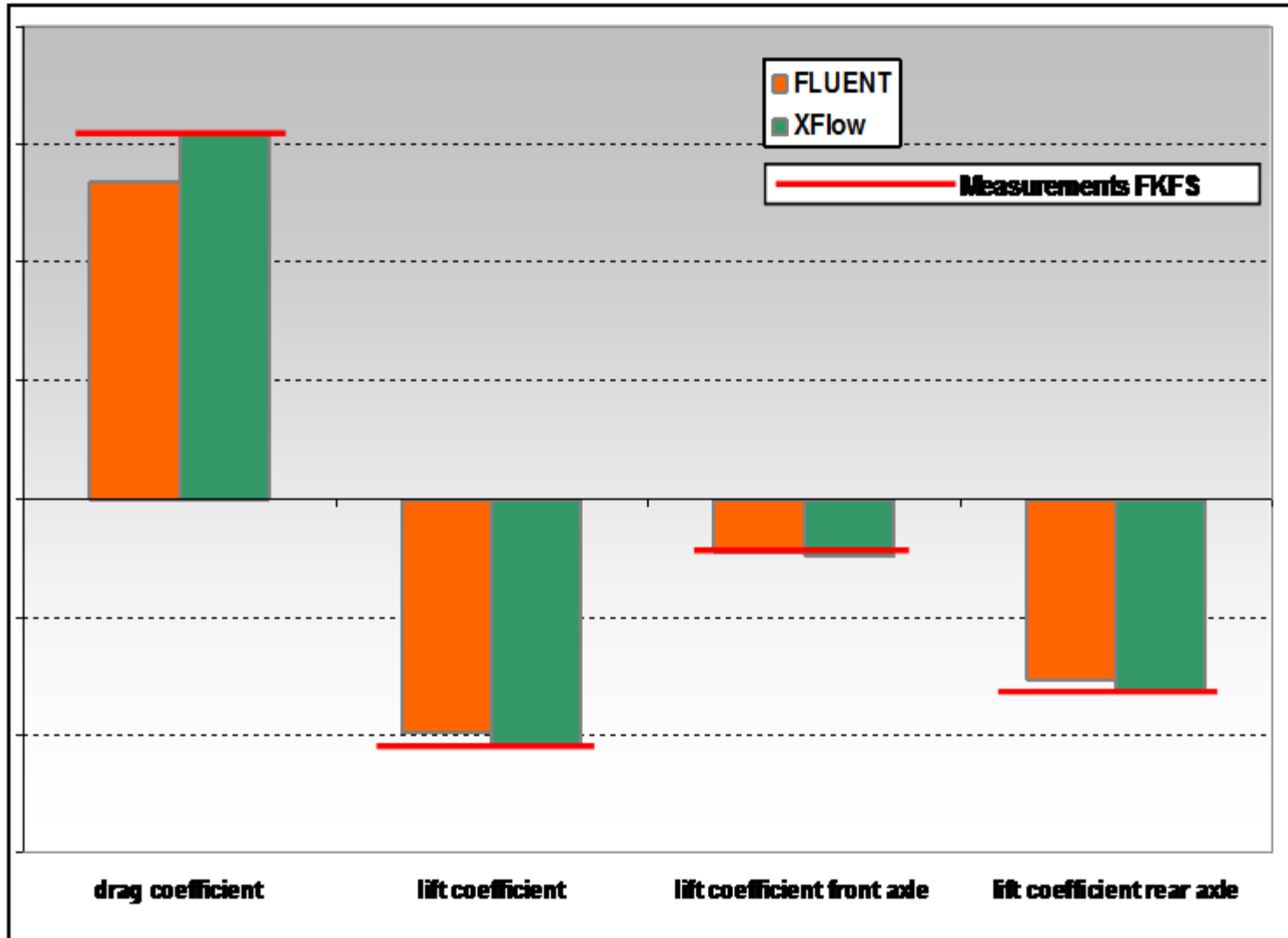
■ 涡度变化



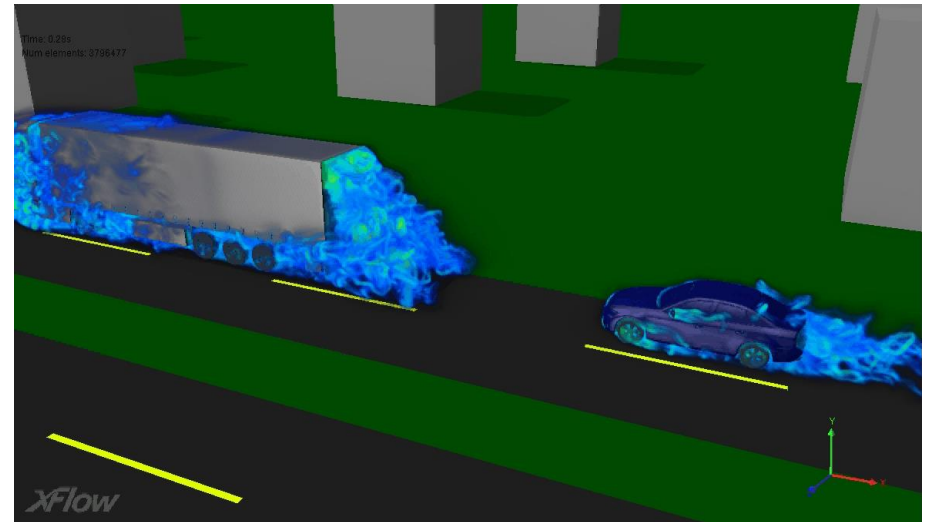
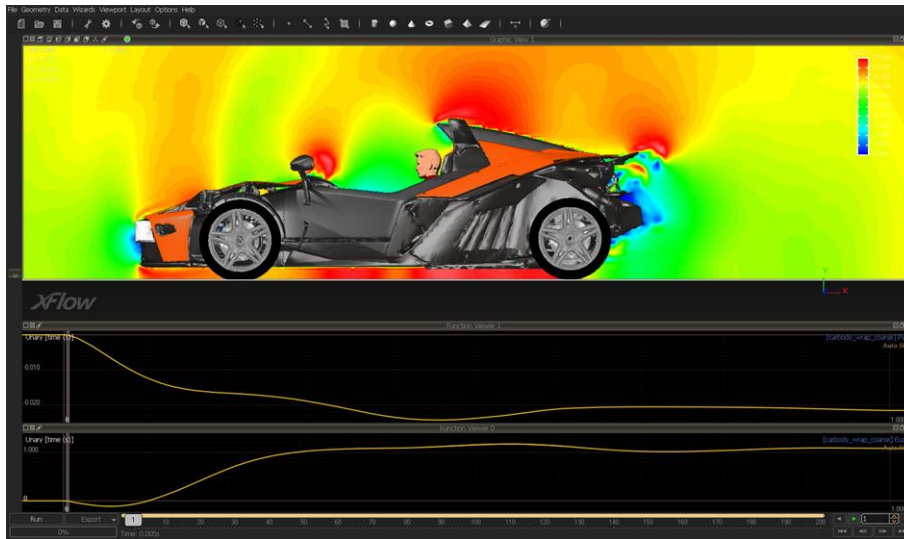
KTM X-Bow



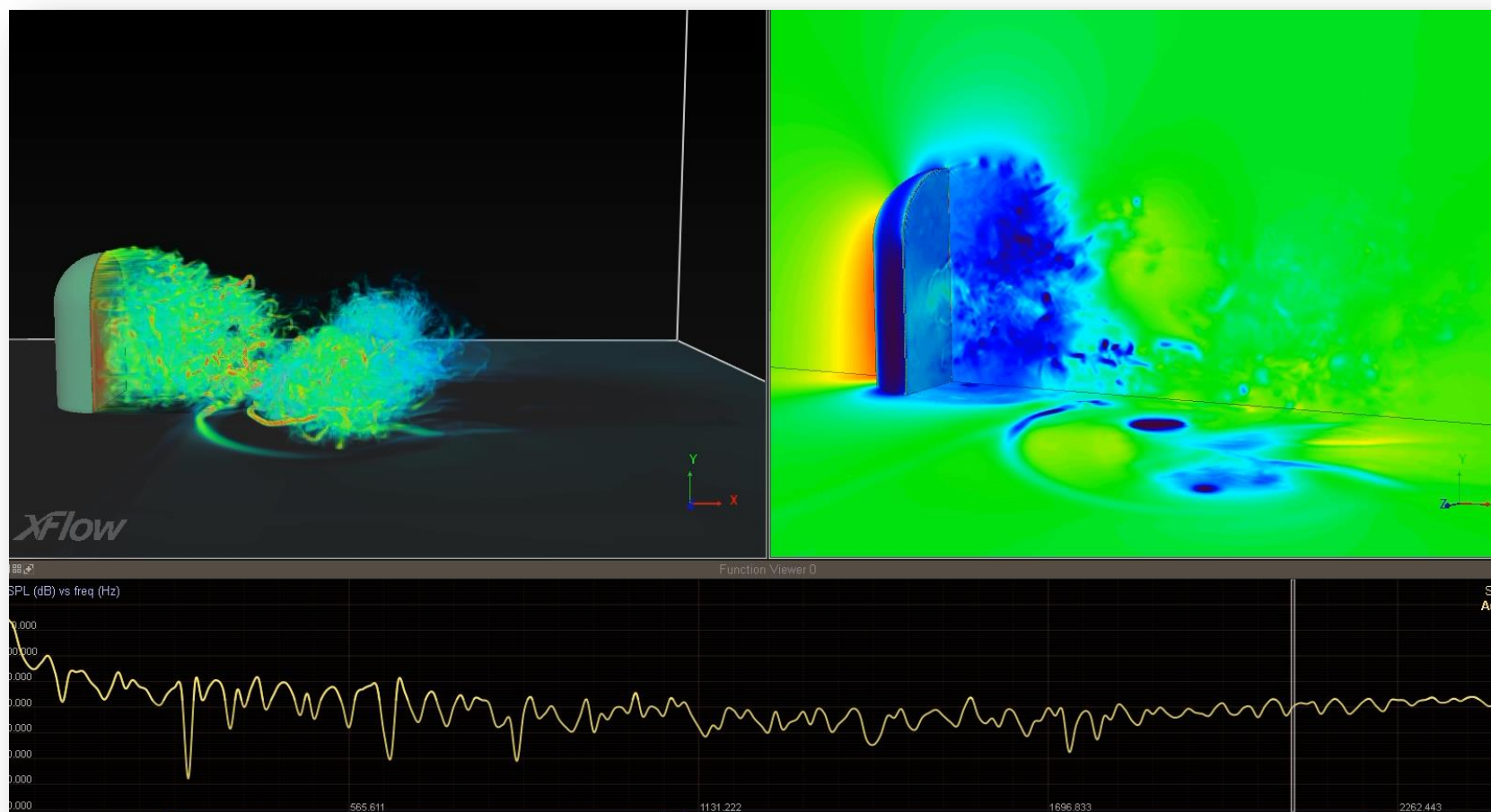
KTM X-Bow

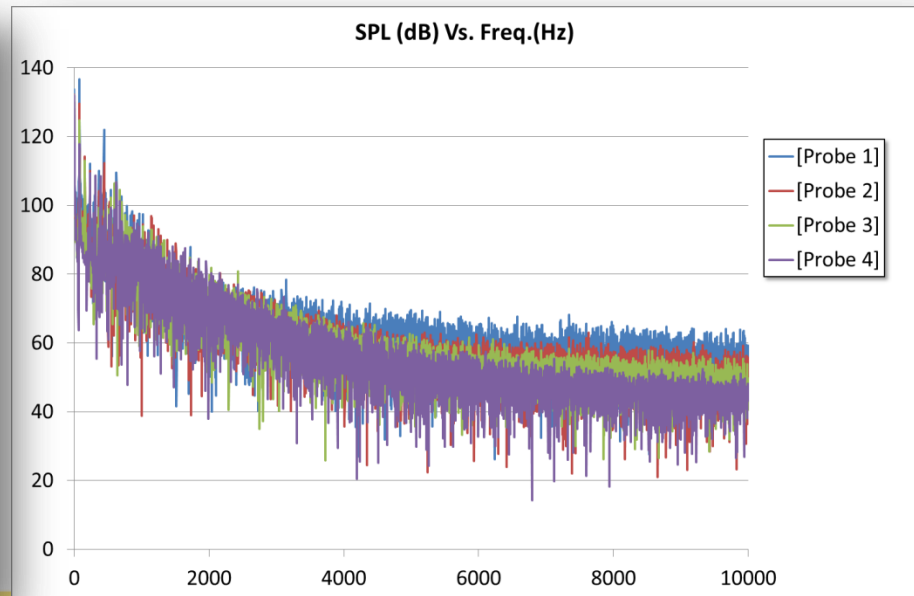
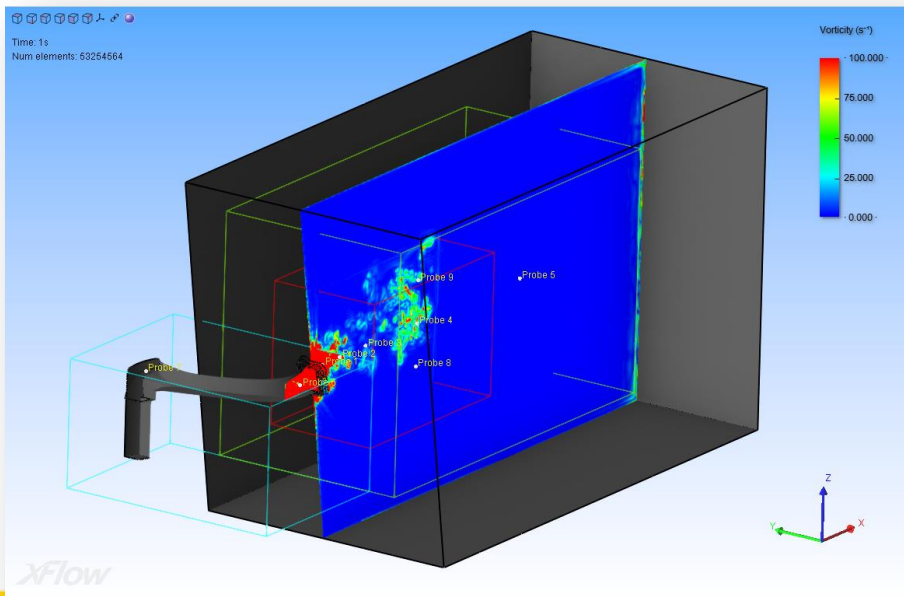
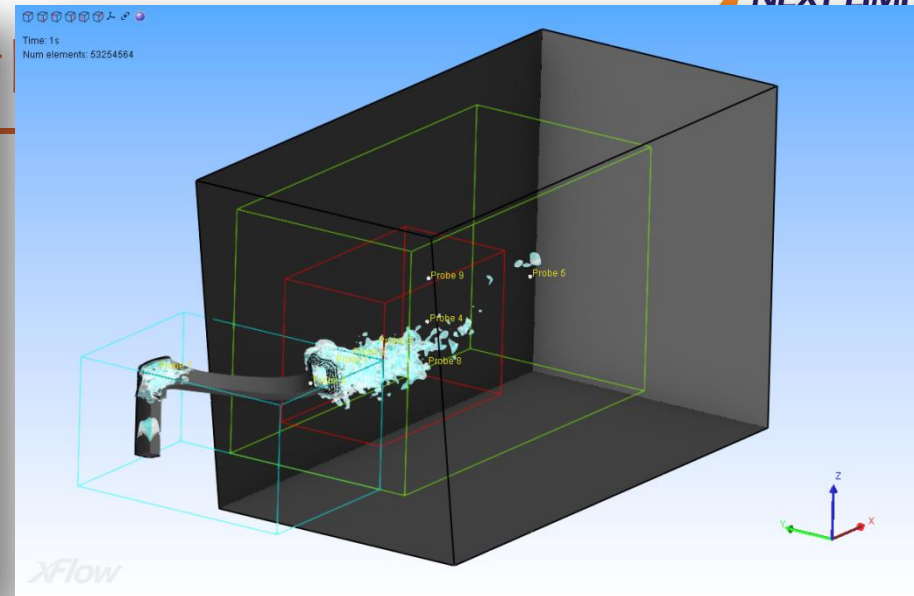
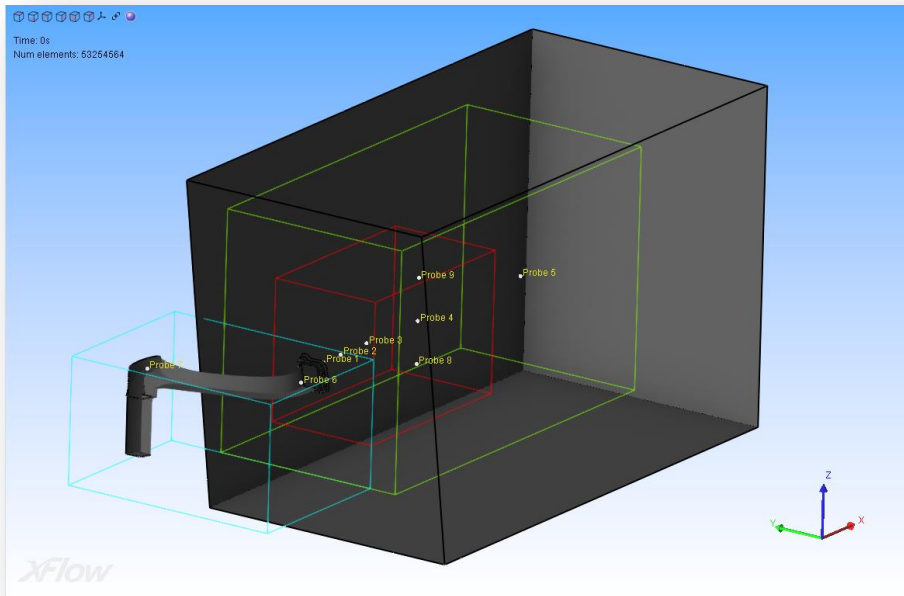


Advanced Aerodynamics



气动噪声





并行效率

SMP scalability

External aerodynamics around commercial vehicle

Range of resolved scales: (0.005m - 0.125m)

Number of elements: 111,8 millions

Peak memory usage: 25Gb

Hardware:

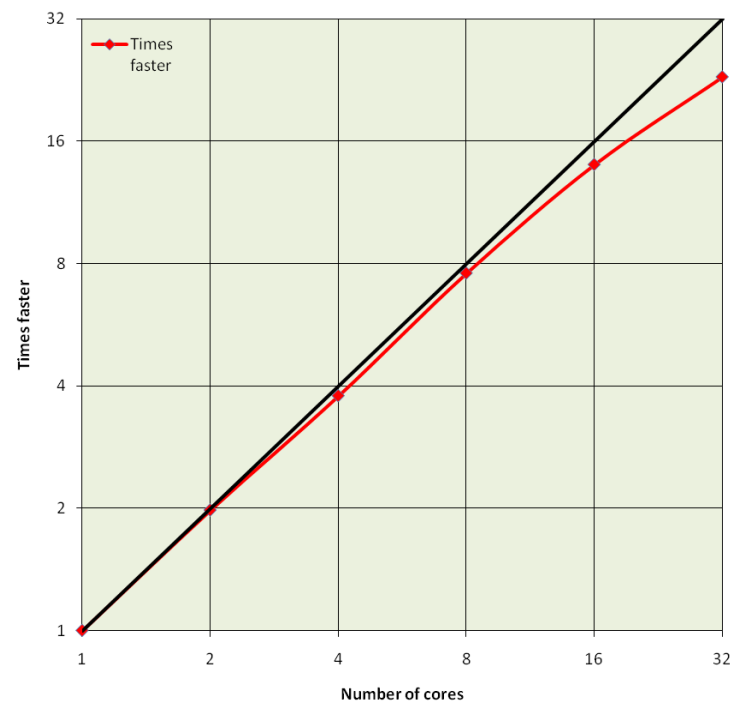
x3950M2 - Intel® Xeon® Processor X7350 (2.93GHz, 2x4MB L2 cache)

8 processors/32 cores

128GB of memory

2 * (4 * 73GB SAS Internal disks)

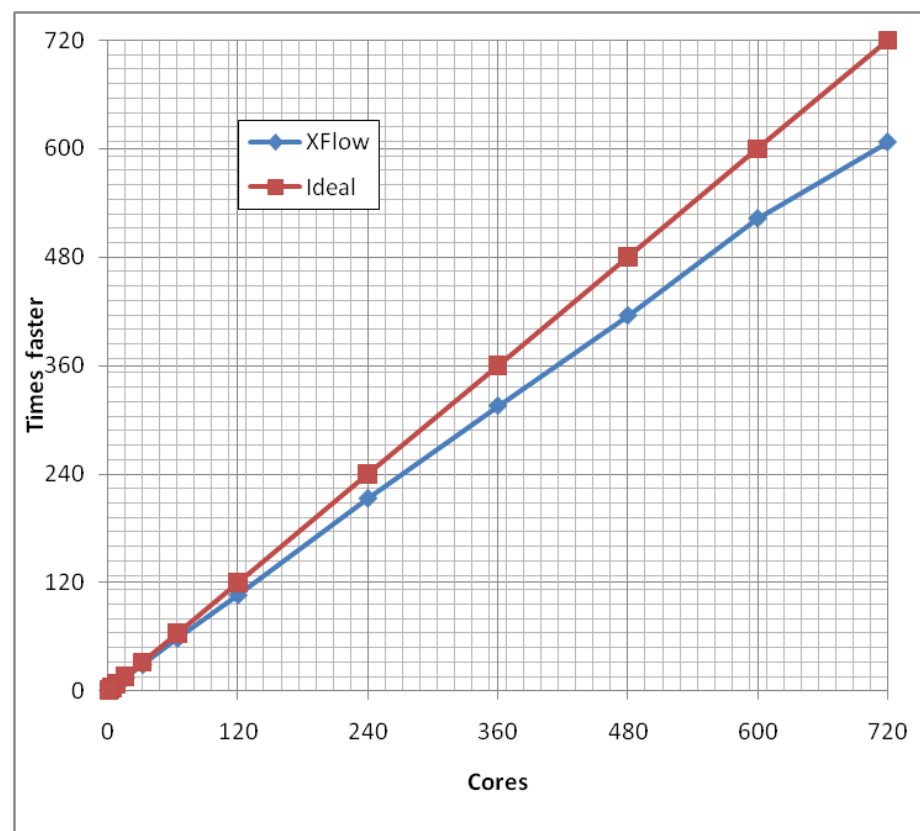
Number of cores	Times faster	Seconds per time step
1	1	9200
2	1.98	4646
4	3.78	2434
8	7.58	1214
16	14.02	656
32	23.04	399



并行效率

DMP scalability

Lid-Driven Cavity		Reynolds 50000	
		16 million elements	
MILLIONS OF ELEMENTS PER SECOND	TIMES FASTER	EFFICIENCY	
246.1538462	607.2307692	84.34%	
211.9205298	522.781457	87.13%	
168.4210526	415.4736842	86.56%	
128	315.76	87.71%	
86.48648649	213.3513514	88.90%	
43.12668464	106.3881402	88.66%	
23.63367799	58.30132939	91.10%	
11.92250373	29.41132638	91.91%	
6.003752345	14.81050657	92.57%	
3.036053131	7.489563567	93.62%	
1.548886738	3.820909971	95.52%	
0.806858296	1.990418558	99.52%	
0.405371168	1	100.00%	



提纲

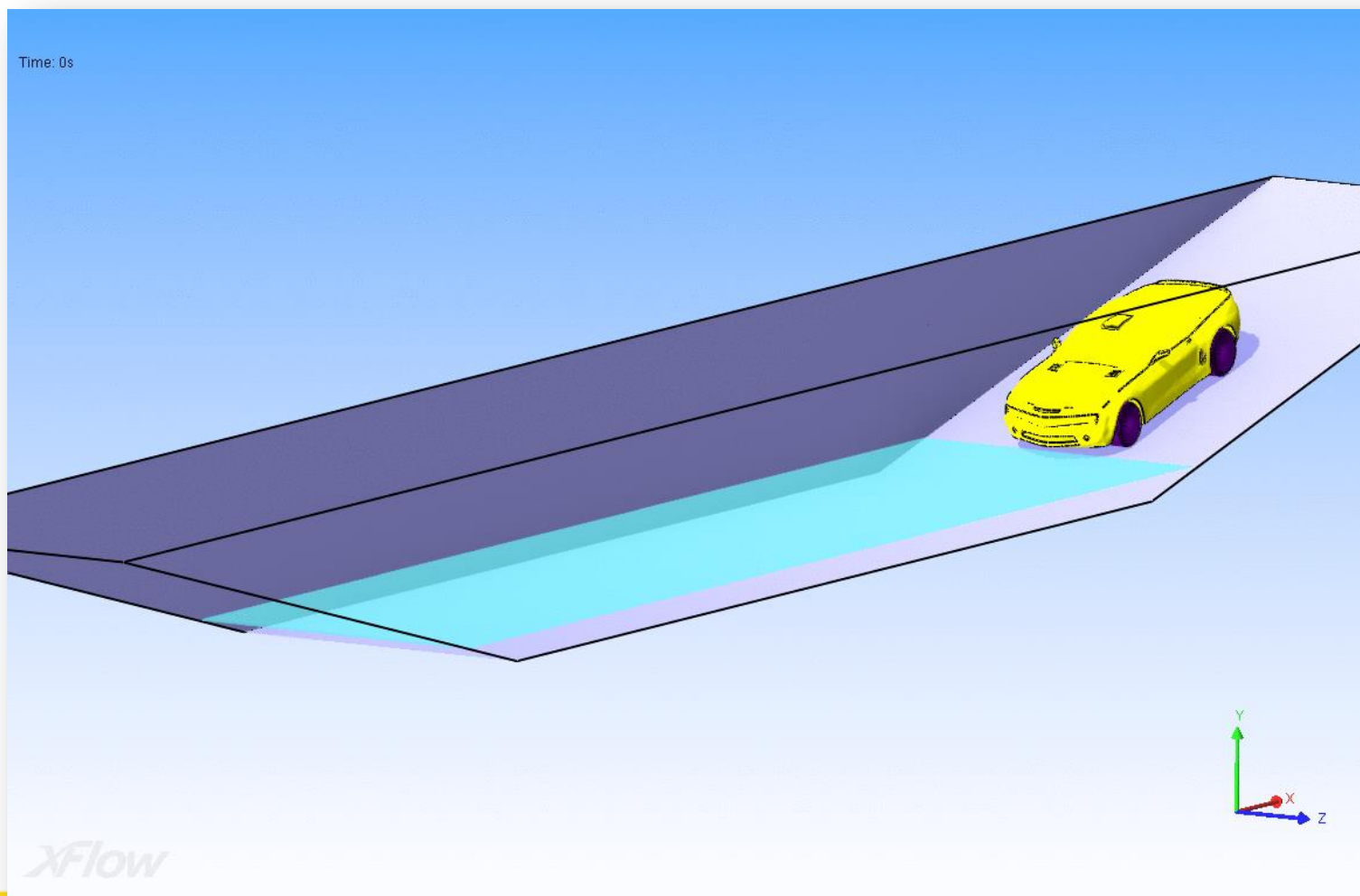
- 开发商介绍
- XFlow的创新技术
- 新一代的数值方法
- 应用优势
 - 空气动力学及噪声
 - 自由表面及多相流
- 开发计划



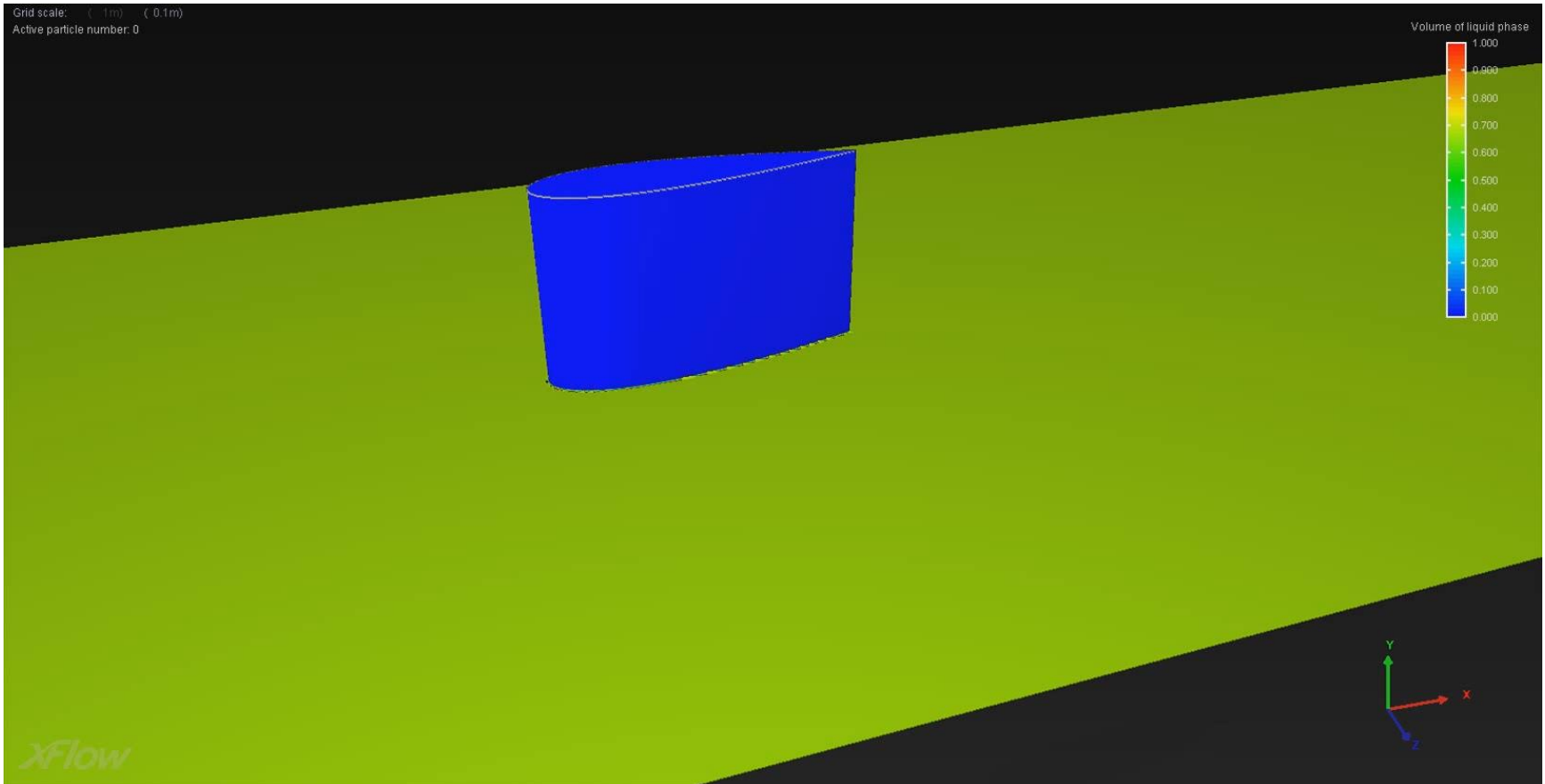
自由表面仿真

涉水计算

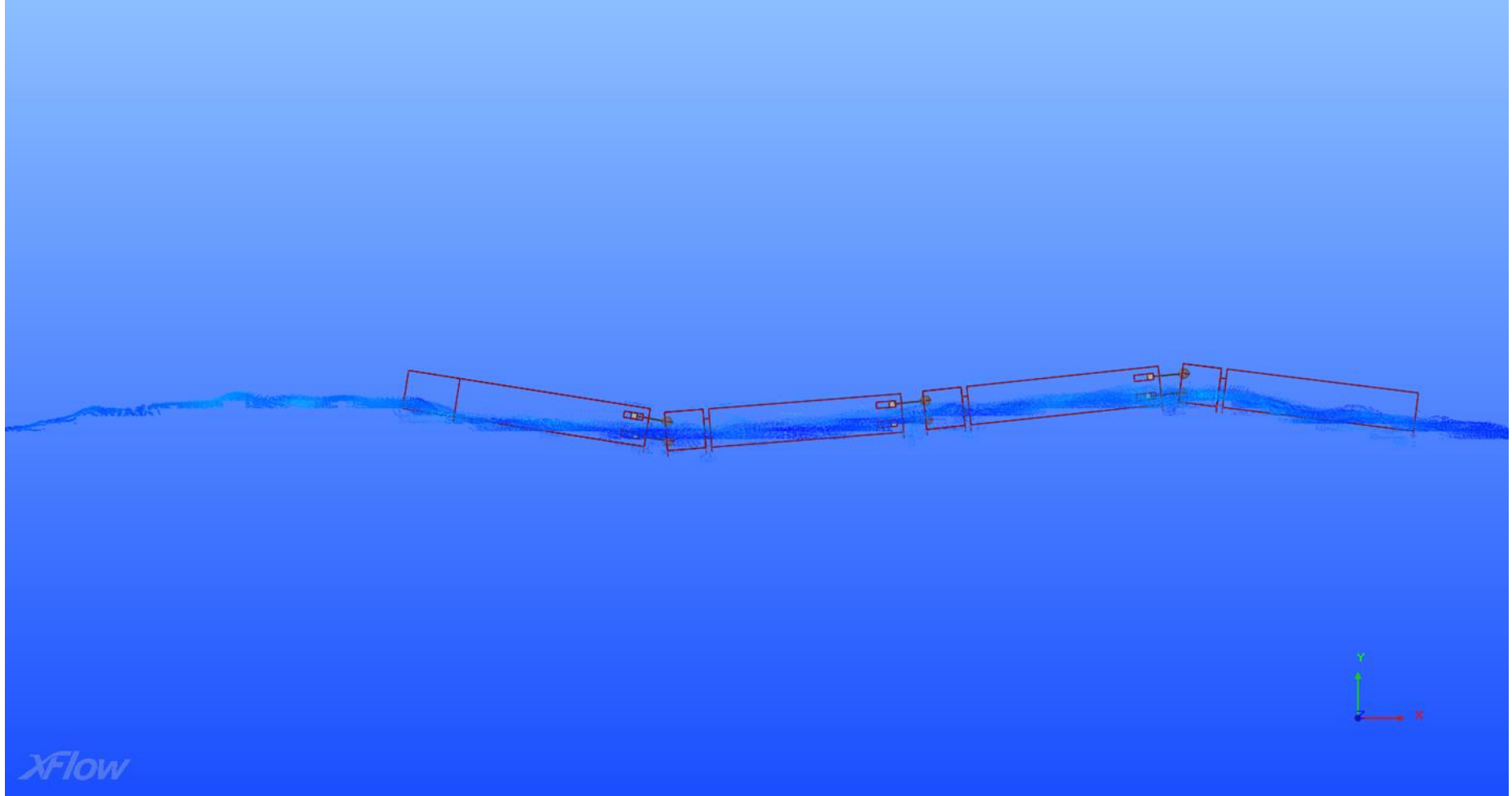
■ 整车涉水



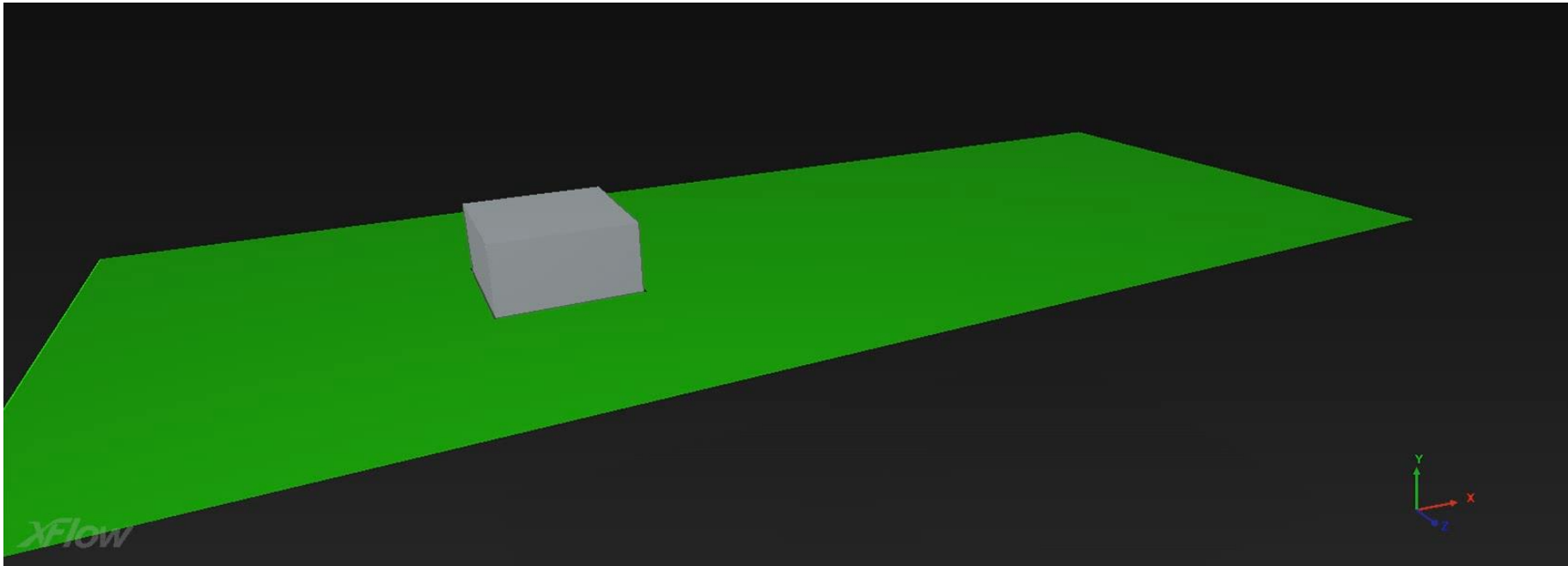
External Hydrodynamics



Hydrodynamics – 多体动力学 (FSI)



External Hydrodynamics

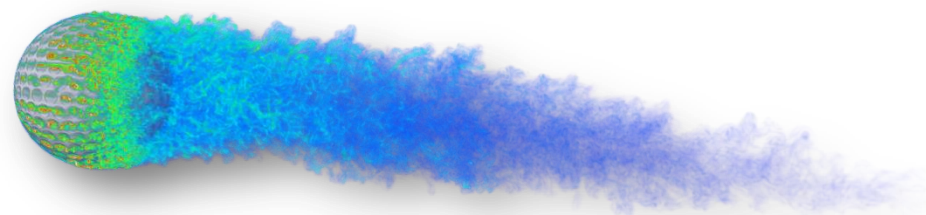


喷嘴计算



提纲

- 开发商介绍
- XFlow的创新技术
- 新一代的数值方法
- 应用优势
 - 空气动力学及噪声
 - 自由表面及多相流
- 开发计划



开发计划

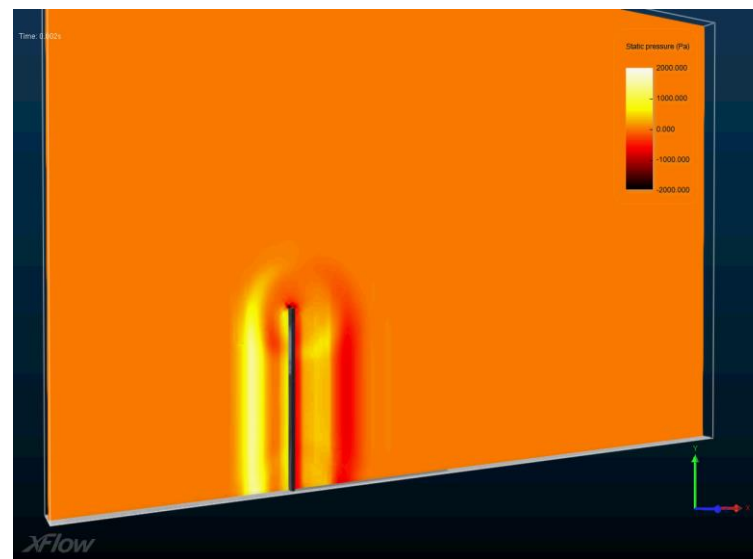
- 现有版本仿真功能汇总
 - 外流/内流空气动力学性能
 - 自由表面
 - 热分析
 - 多孔介质
 - 非牛顿材料
 - 高级模型: 运动部件, 强迫运动和多体系统动力学
- 接口
 - 几何: STEP, IGES , STL
 - 用户自定义数据: 函数和表列数据
 - 流固耦合: 与MSC.ADAMS单向耦合
 - 后处理: Paraview 和 Ensight Gold

开发计划

XFlow2013 主要功能开发计划



- 完全MPI支持
- OpenFSI双向耦合
- 多相流求解器
- DPM双向耦合
- 完全可压缩求解器



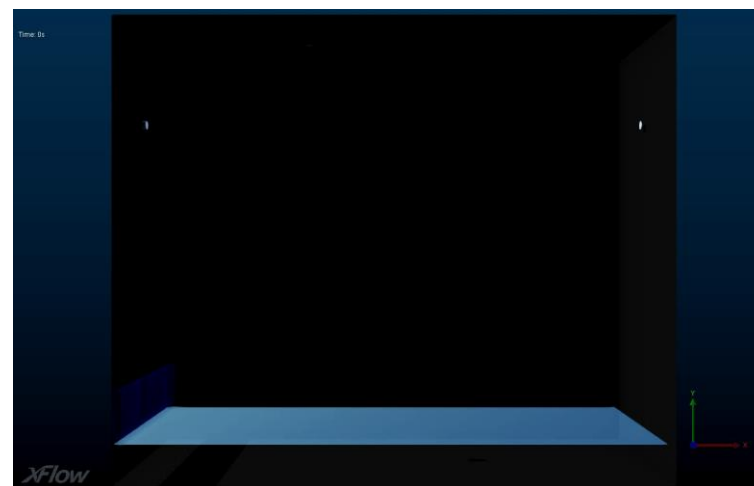
FSI: 耦合NASTRAN (OpenFSI)

开发计划

XFlow2013 主要功能开发计划



- 完全MPI支持
- OpenFSI双向耦合
- 多相流求解器
- DPM双向耦合
- 完全可压缩求解器



Discrete Phase Model

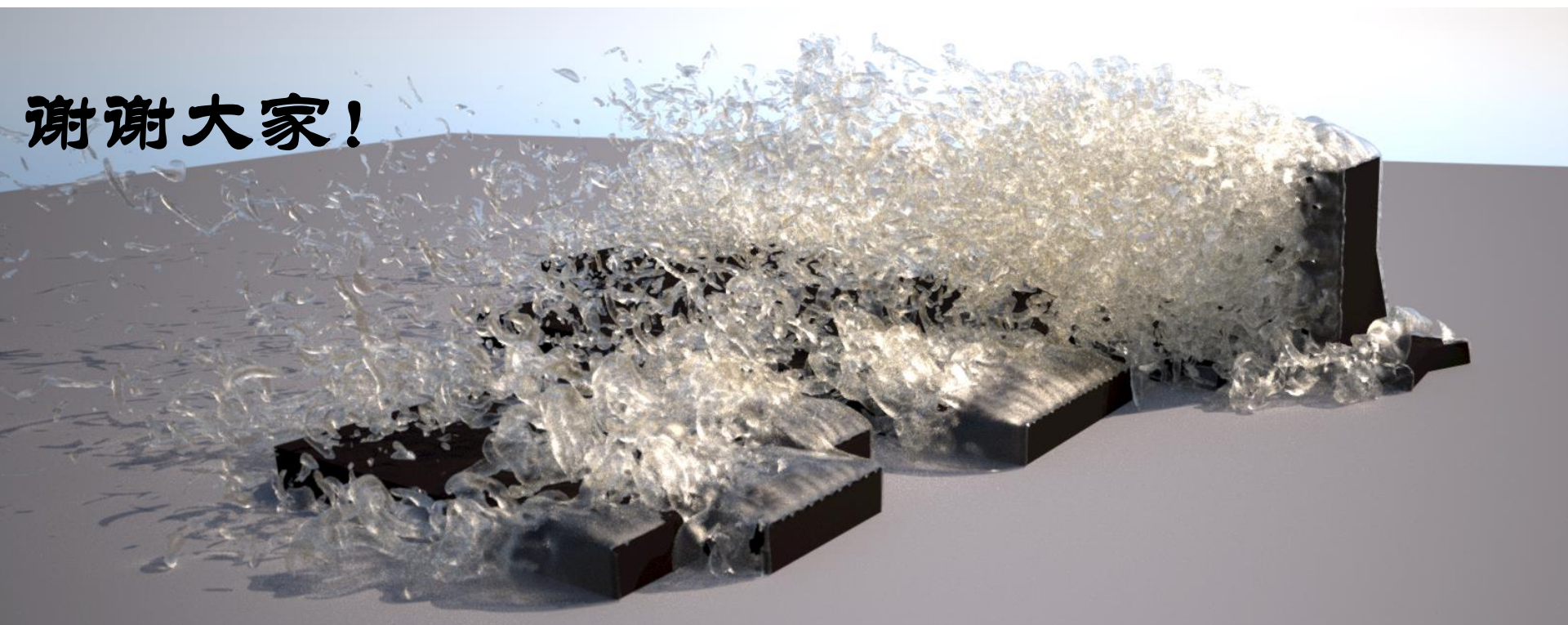
开发计划

XFlow2013 主要功能开发计划



- 完全MPI支持
- OpenFSI双向耦合
- 多相流求解器
- DPM双向耦合
- 完全可压缩求解器

谢谢大家!



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: 021-50589292