

ANSYS®



ANSYS中国技术大会  
中国·上海

# ANSYS FENSAP-ICE介绍

—— 先进的飞行结冰通用三维仿真系统

刘鹏飞/ 工程师  
北京银景科技有限公司

# 报告内容

飞行结冰基础知识

FENSAP-ICE介绍

模块组成

图形界面

新版本改进

# 报告内容

## 飞行结冰基础知识

### FENSAP-ICE介绍

模块组成

图形界面

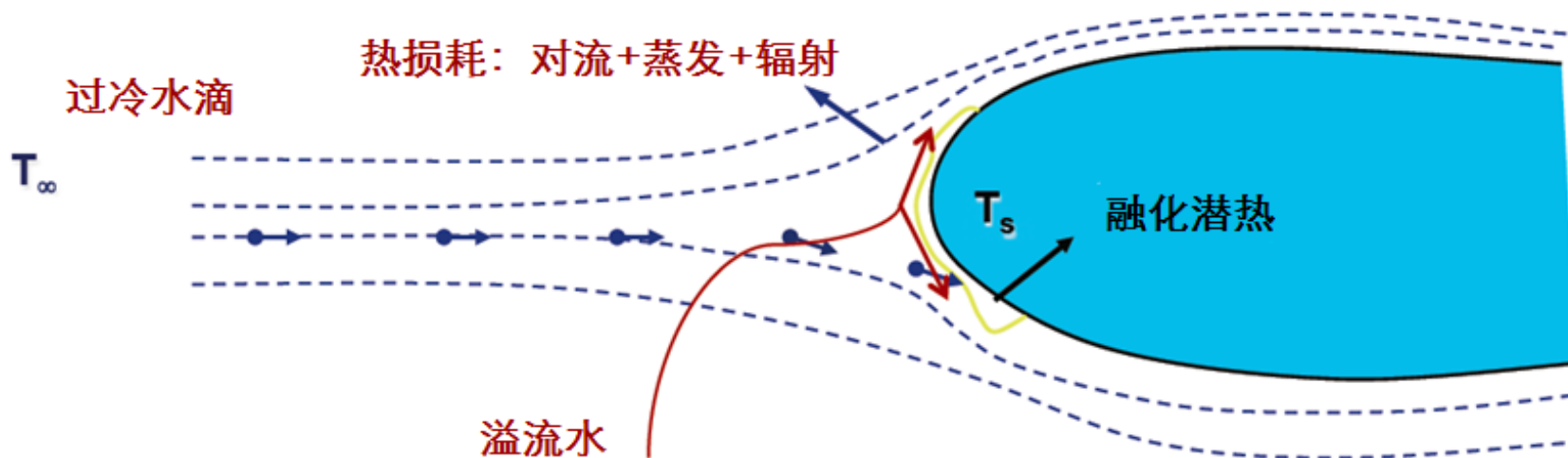
新版本改进

# 什么是飞机结冰？



# 飞行结冰：原因

- 飞机结冰是由于云层中的过冷水滴（低于冰点仍处于液态的水滴）被飞机部件表面捕获引起的；
- 飞机进入结冰云层后，外界温度  $T < 0^{\circ}\text{C}$ ，过冷水滴撞击到飞机部件迎风面，形成积冰。积冰冰形及其粗糙度会对机翼、螺旋桨等部件的气动外形造成严重破坏。

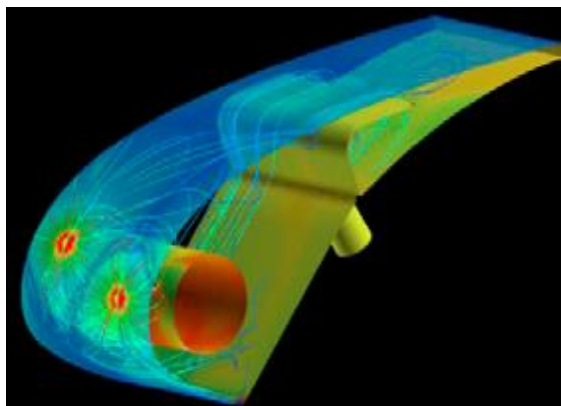


# 飞行结冰：危害

- **气动性能损失**（升力、阻力和力矩）和**操纵特性的下降**：
  - 给定攻角下升力下降
  - $C_{L,max}$  下降
  - 粗糙度和分离导致阻力增加
  - 降低了失速裕度（较小的攻角下失速、更大的速度避免失速）
  - 重量增加，重心位置改变
  - 非对称积冰引起的操稳问题
- 积冰可能**堵塞发动机进气道**、内涵道，增加压力损失；如果吸入内部，会破坏发动机部件，导致推力损失、熄火和瞬态性能的下降；
- 风挡结冰影响飞行员视线、探头结冰导致读数失真以及油管结冰影响燃油供给。

# 研究飞行结冰的手段

- 三种方法（CFD、EFD、FFD）不排斥，相互补充。
- 但某些情形下，只能用其中的一种方法：
  - CFD是**唯一**能探索整个结冰包线的手段；
  - EFD是**唯一**能针对设计点完成湿空气试验的手段；
  - FFD是**唯一**能完成整个A/C规定的手段



**CFD: FENSAP-ICE**



**EFD: NASA-IRT**



**FFD**



# 研究飞行结冰的手段

- 用于设计、优化和表明符合性的三种手段及花费如下：

1) 仿真分析 (CFD)	\$2,000	
2) 冰风洞试验 (EFD)	\$250,000	每周花费
3) 飞行试验 (FFD)	\$500,000	



# CFD方法研究飞行结冰的现状

- 世界范围内许多大学、研究所和组织都开展了水滴轨迹、撞击和积冰增长代码的开发工作。
- 其中一些代码已经在飞机结冰防护的设计和适航取证中有所应用，如美国NASA格兰研究中心的LEWICE、拿大庞巴迪的CANICE 2.5、意大利CIRA的HELICE和MULTI-ICE、英国DERA的TRAJICE2等。
- 上述代码都拥有配套冰风洞作为试验数据库，一般仅服务于本国飞机结冰研究，并未实现商业化。

# 报告内容

飞行结冰基础知识

**FENSAP-ICE介绍**

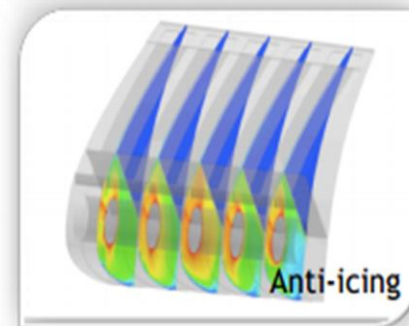
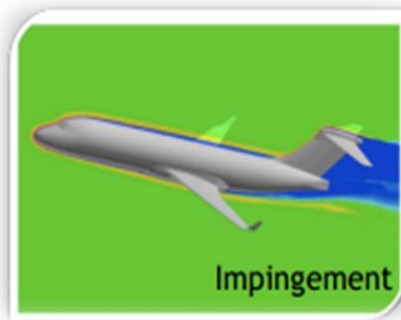
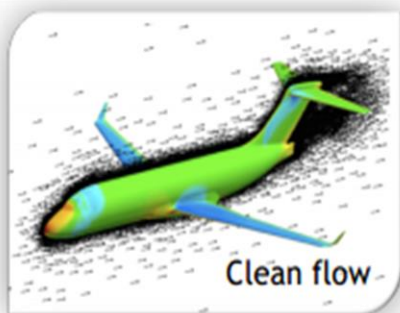
**模块组成**

图形界面

新版本改进

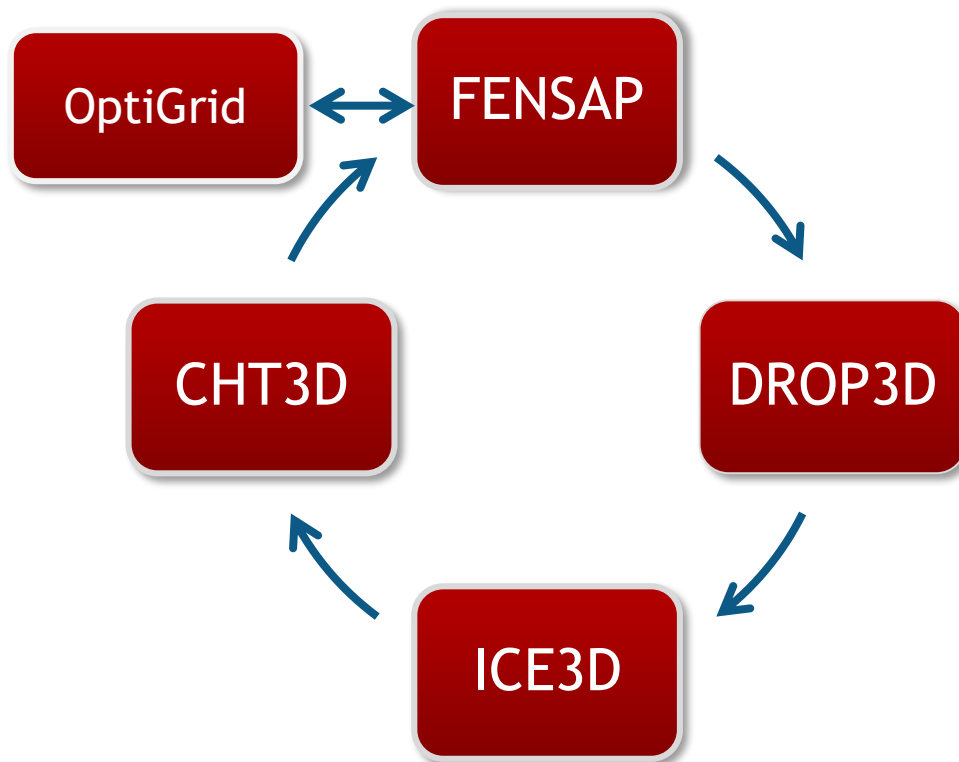
# ANSYS FENSAP-ICE介绍

- ANSYS-FENSAP-ICE是**唯一的全三维商用**飞行结冰仿真分析软件；
- 将**流场求解 (FENSAP)**、**水滴撞击 (DROP3D)**、**积冰增长 (ICE3D)**、**防/除冰热载荷 (CHT3D)**、**气动性能损失计算无缝耦合**在一起；
- 广泛应用于全球20个国家和国内多数飞机、发动机研究所。



# ANSYS FENSAP-ICE模块构成

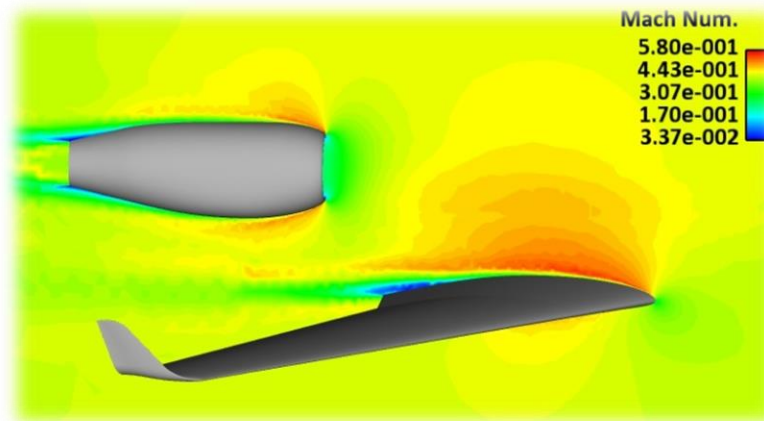
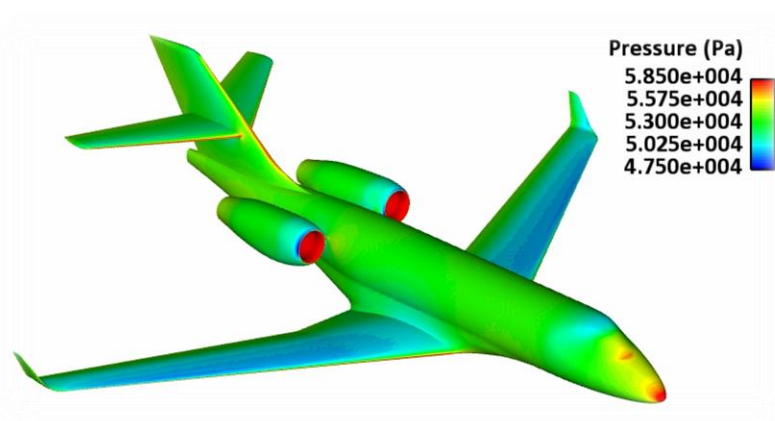
- FENSAP-ICE的五个模块将流场分析、水滴撞击、积冰增长、防除冰热耦合和网格优化集成在一起，形成了完整灵活的飞行结冰仿真系统；
- 各模块之间由易用明了的图形界面无缝连接。每个模块都与非结构、结构网格兼容



# ANSYS FENSAP-ICE模块构成

## 1. FENSAP：外流场求解

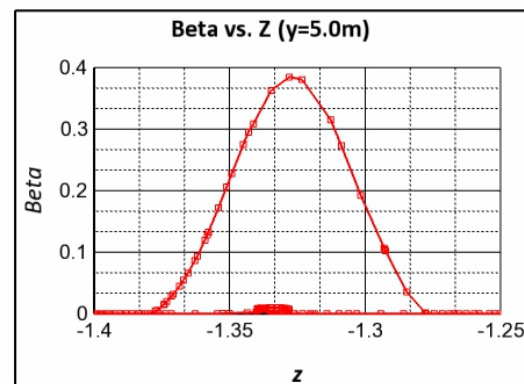
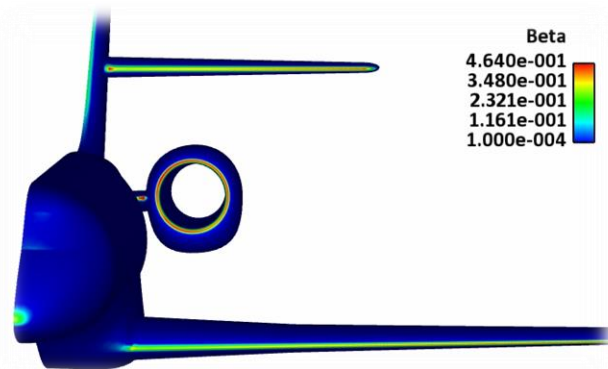
- 求得对应飞行条件下每个网格节点上的速度、压力、温度，并给出结冰分析所需的表面热流和剪切力
- 分析冰形，需**添加表面粗糙度**，防除冰计算则不需要



# ANSYS FENSAP-ICE模块构成

## 2. DROP3D：水滴撞击特性求解

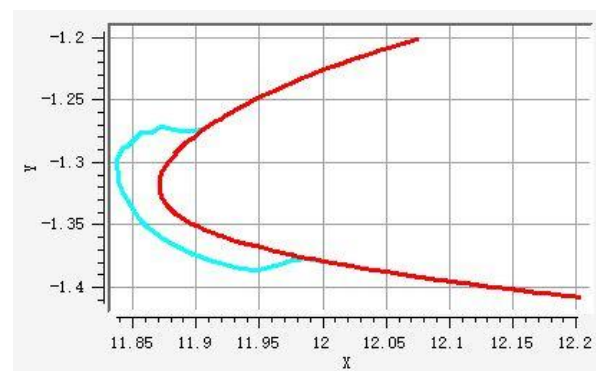
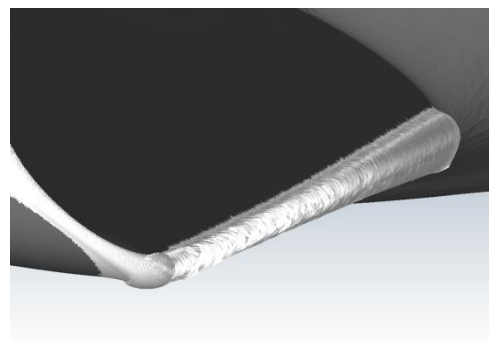
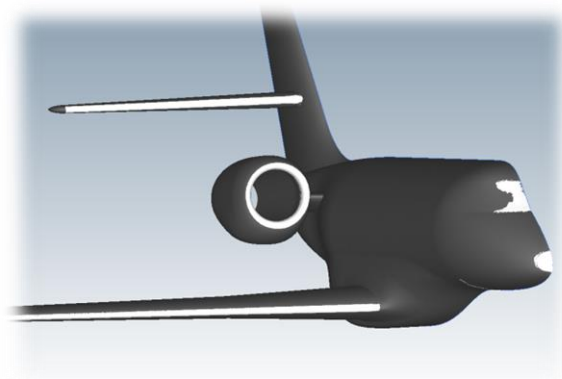
- 求得对应飞行条件下每个网格节点上的LWC、水滴速度及整机表面的收集系数
- 水滴参数可由附录C中选取或用户自定义
- 可分析过冷大水滴（SLD），包含破碎、反弹等模型



# ANSYS FENSAP-ICE模块构成

## 3. ICE3D：积冰增长、水膜热分析计算

- 求得相应结冰条件下飞机表面积冰冰形、水膜厚度分布
- 可直接输出结冰后网格，用于性能下降分析和多次结冰
- 在防除冰分析时，可用于计算水膜热平衡，作为CHT的初始化



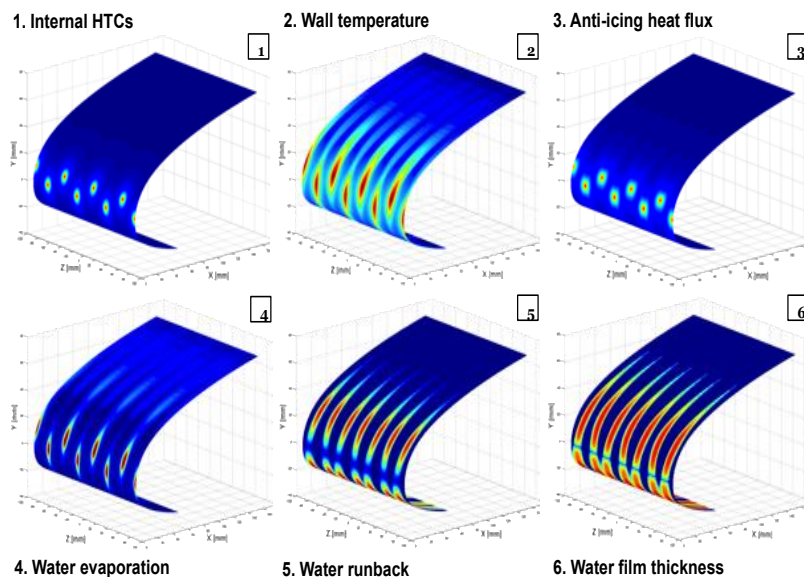
页



# ANSYS FENSAP-ICE模块构成

## 4. CHT3D：防、除冰冰耦合分析

- 针对给定条件，将外流场、蒙皮导热耦合在一起（适用于**干空气**换热计算）；也可把水滴场、水膜热平衡集成在一起（适用于**湿空气**防除冰计算）
- 防冰分析为稳态计算，除冰分析为瞬态计算
- 广泛应用于笛形管热气防冰、风挡电热除冰等流固换热领域

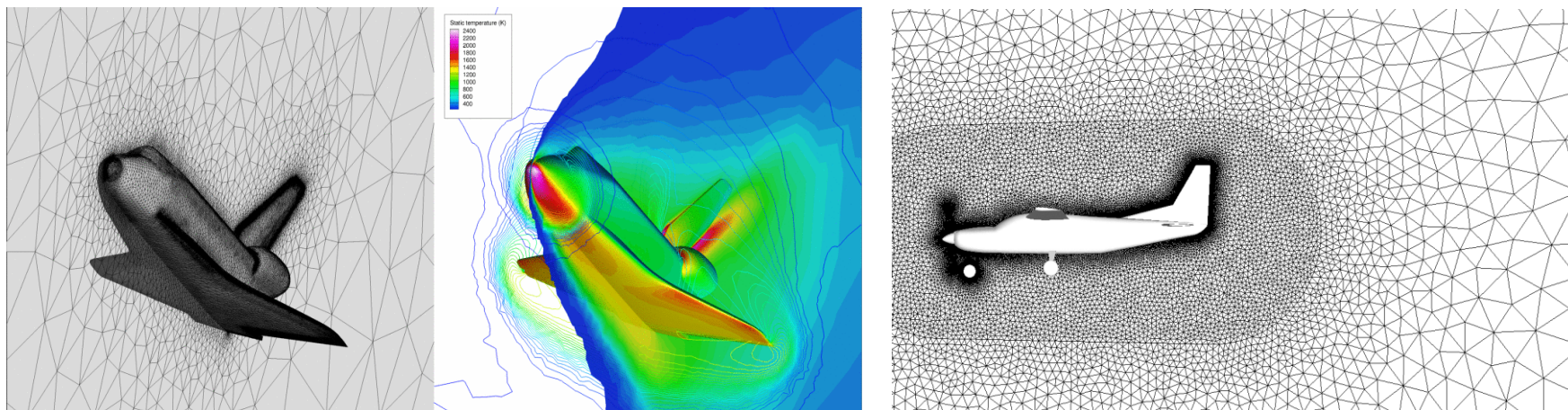


笛形管热气防冰蒙皮温度分布

# ANSYS FENSAP-ICE模块构成

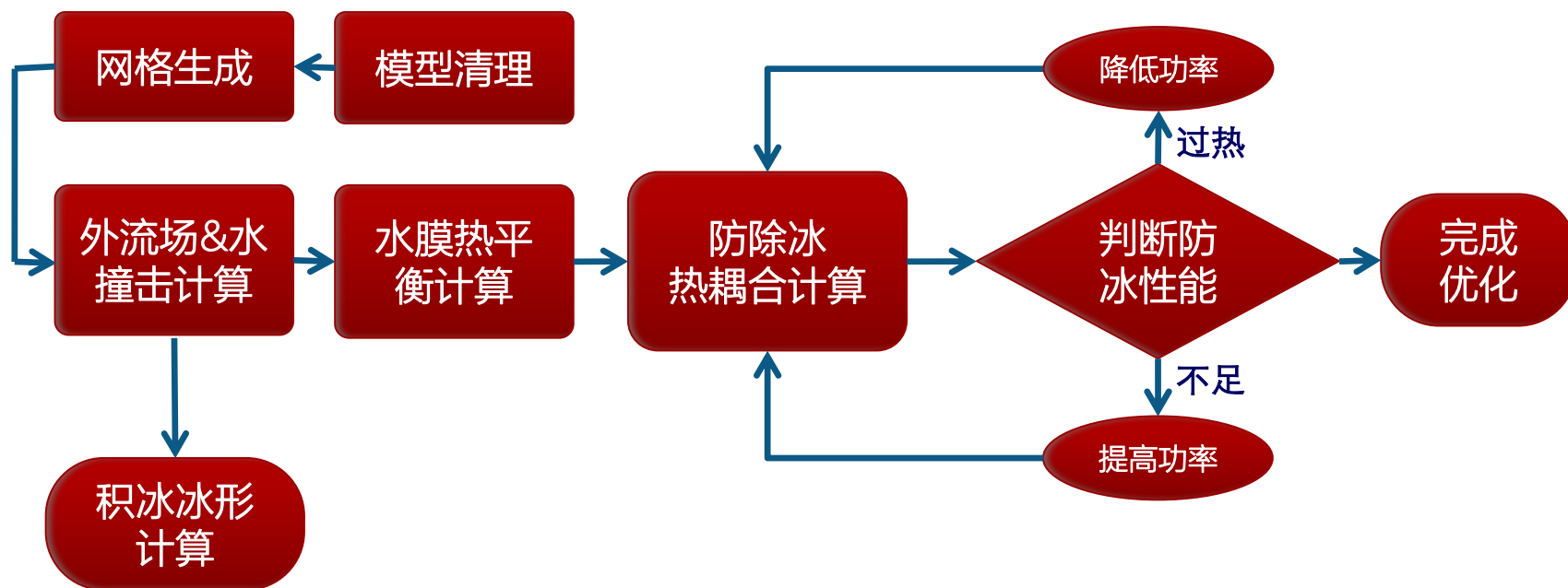
## 5. OptiGrid : 先进的网格自适应优化工具

- 给定流动条件下，初始网格做得再好，自适应后的网格总会更好一些。
- 通过自适应可精确捕捉边界层、激波、涡等复杂物理现象。
- 同样的网格量，计算精度大大提升！



# ANSYS FENSAP-ICE模块构成

## FENSAP-ICE结冰/防除冰计算流程



# ANSYS FENSAP-ICE辅助结冰适航取证

## 符合性说明替代手段

- EADS/CASA C-295

## 结冰试验设备设计

- AB-139、BA-609、Dash 8Q400

## 结冰分析仪器设计

- ARJ21、ATR42、RC-26B

# ANSYS FENSAP-ICE辅助结冰适航取证

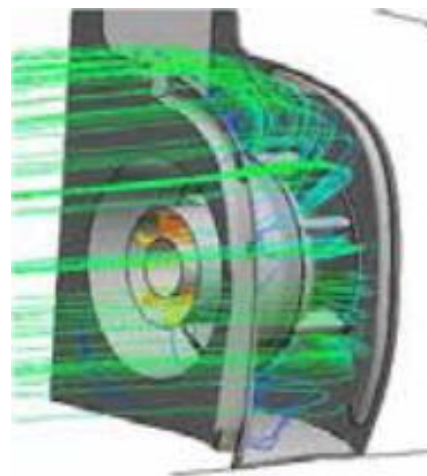
- EADS / CASA的C-295引气系统计划在加拿大NRC的常温冰风洞进行地面结冰试验。由于暖冬现象，低于 $-10^{\circ}\text{C}$ 的低温点都难以测试。
- 决定采用CFD方法对所有严酷试验点进行模拟分析。FENSAP-ICE分析了各试验点的水滴撞击特性。数值结果与试验项目中的试验结果吻合十分良好。
- 适航当局认可了FENSAP-ICE可以作为符合性说明的替代方法进行低温试验点的测试。所有的低温严酷试验点都完成了测试，且引气系统完全符合设计标准。



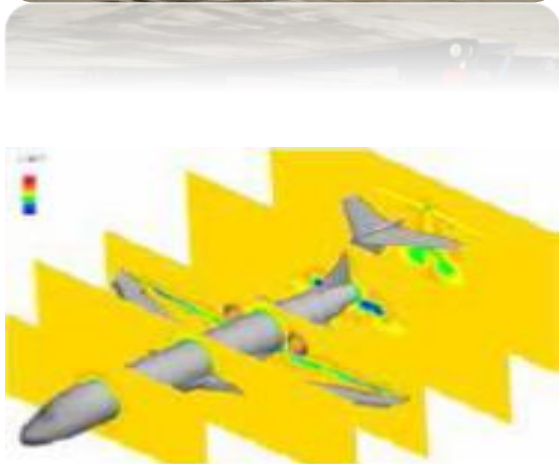


# ANSYS FENSAP-ICE辅助结冰适航取证

- AB139直升机需在**低压室**中进行取证试验，但现场**不能模拟前飞**，只能完成悬停条件的模拟。
- **FENSAP-ICE分析表明悬停比前飞更为严酷**。因为前飞时气流进入前发生90度偏转，而水滴轨迹仍为直线，因此水滴捕获量很少。
- 这一**结论被接受后，试验点减少了一半**。试验在较小的低压室进行即可，从而降低了整体成本。



# ANSYS FENSAP-ICE辅助结冰适航取证



- 中国商飞ARJ21 支线机的FAA FIKI 适航取证采用实验和CFD 测试相结合的方法。
- 工程人员使用FENSAP-ICE 分析了各种飞行条件下整机的水滴撞击特性和积冰增长。得出的冰形被用来分析结冰造成的性能下降。
- 左侧的图片展示了一系列截面上的LWC 分布，计算考虑了机翼上高升力装置以及发动机抽吸效应。



# ANSYS FENSAP-ICE全球客户列表



# 报告内容

飞行结冰基础知识

**FENSAP-ICE介绍**

模块组成

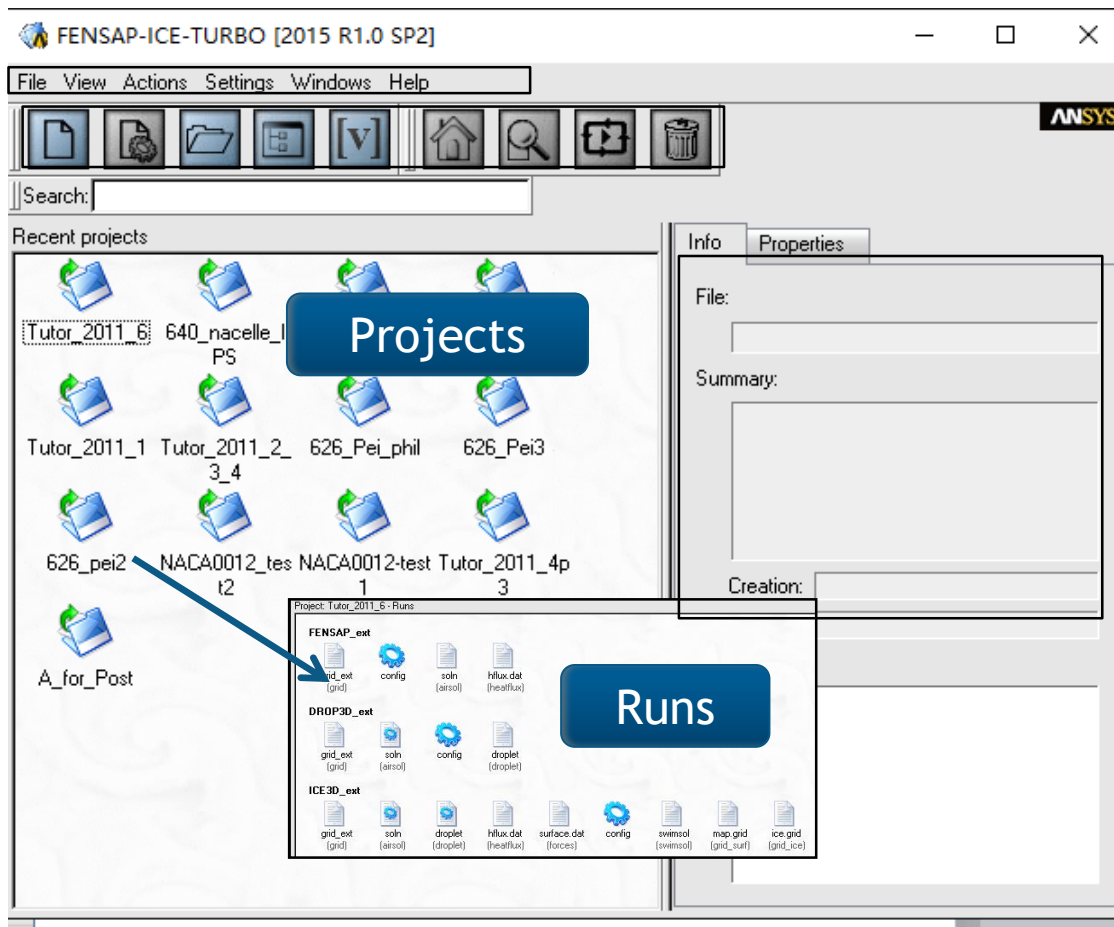
**图形界面**

新版本改进

# FENSAP-ICE图形界面 – Main

菜单栏

图标栏



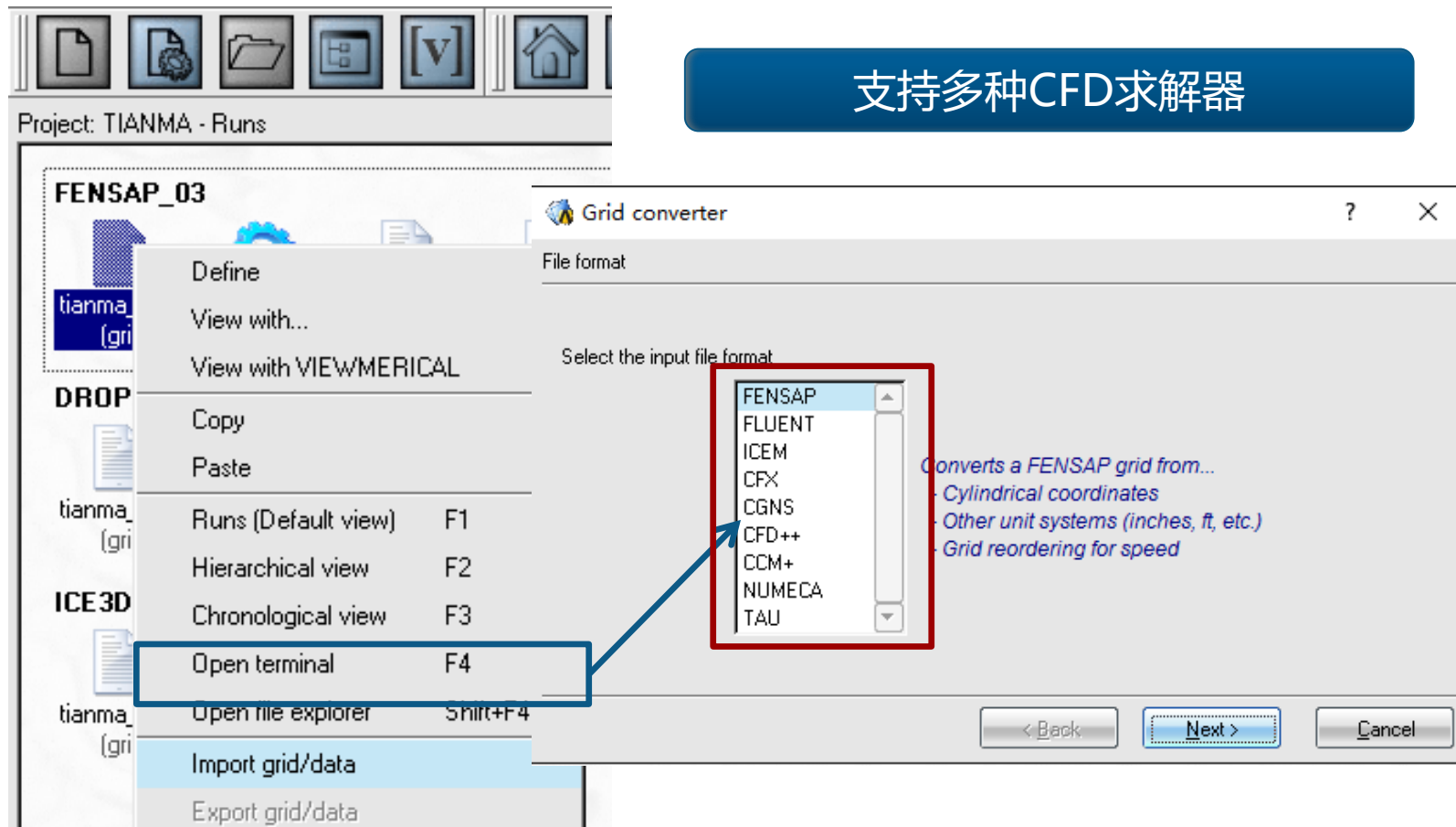
Projects

Runs

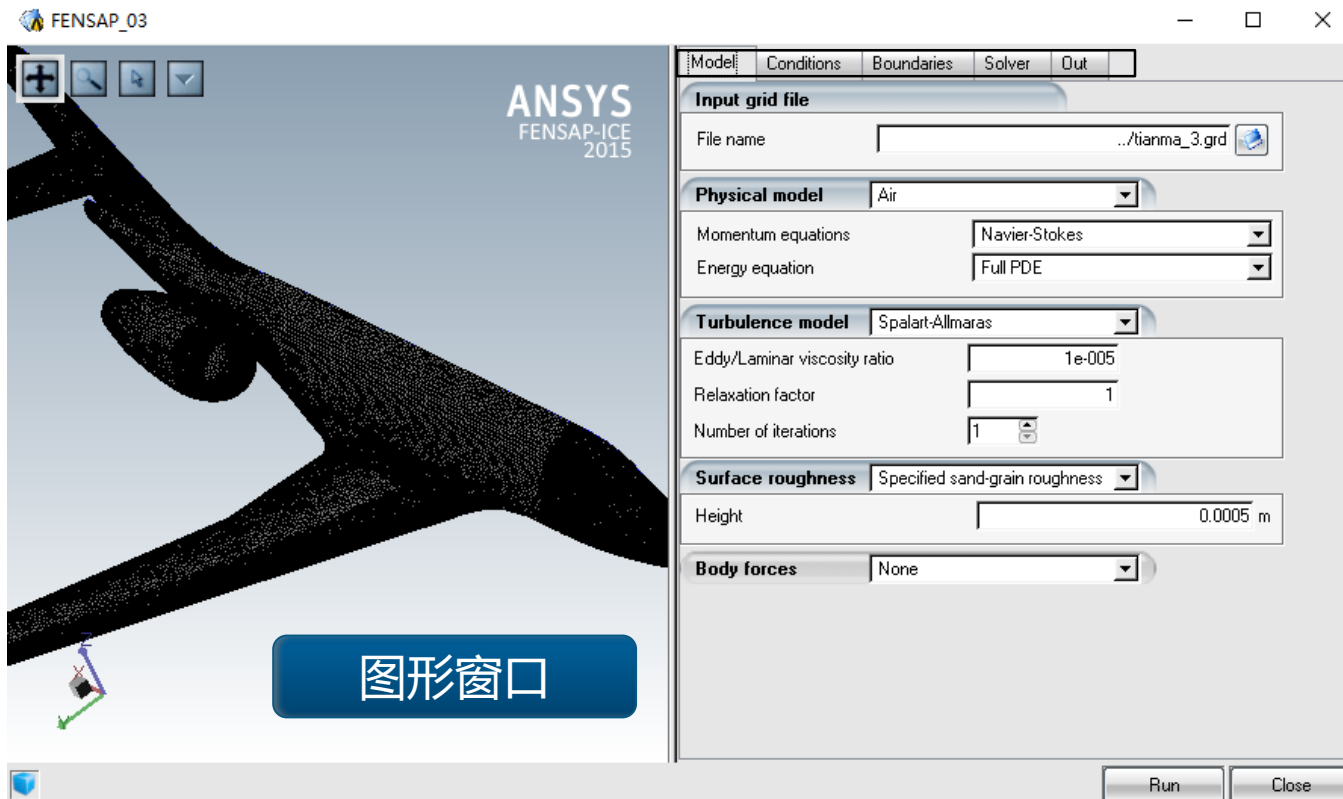
Project信息栏

# FENSAP-ICE图形界面 - 网格导入

支持多种CFD求解器



# FENSAP-ICE图形界面 – Config



模型选择

计算条件

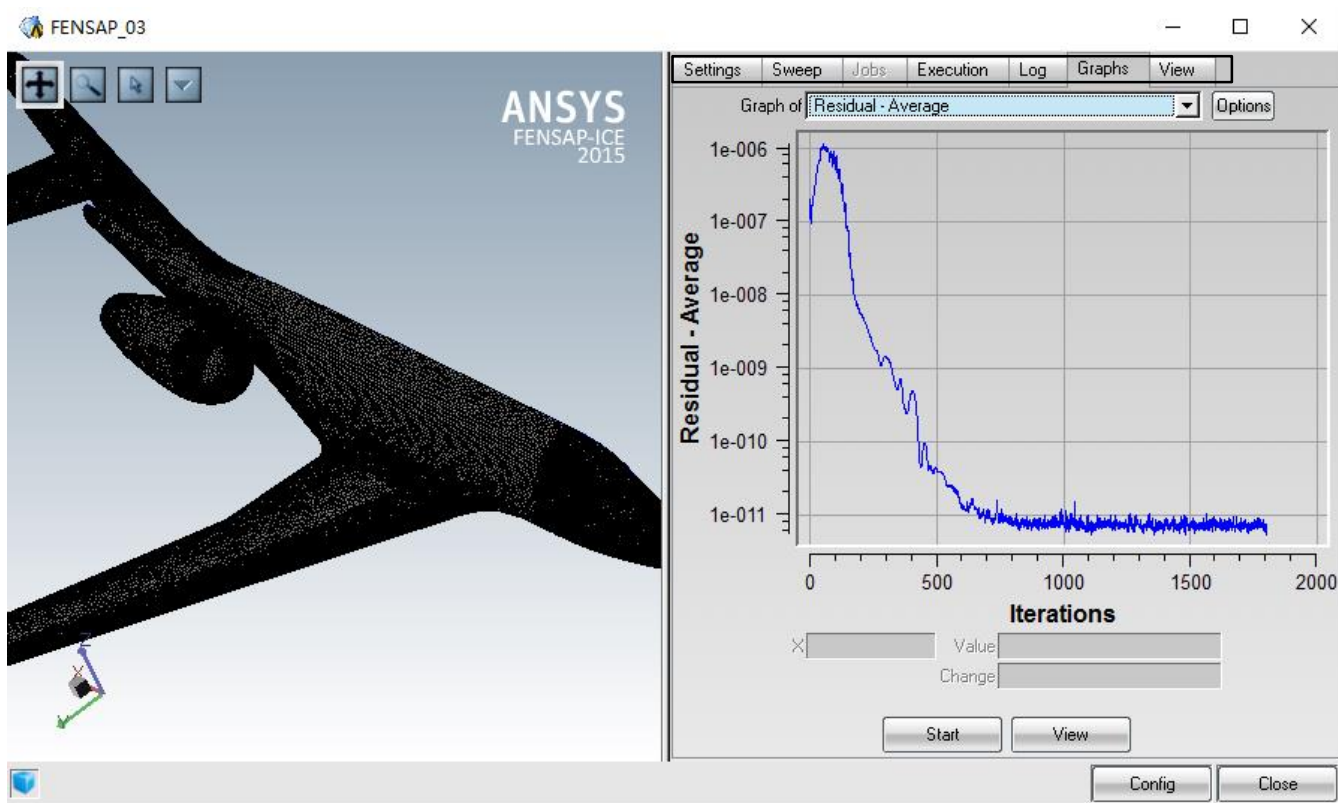
边界设置

求解设置

输出选项

图形窗口

# FENSAP-ICE图形界面 – Run



并行设置

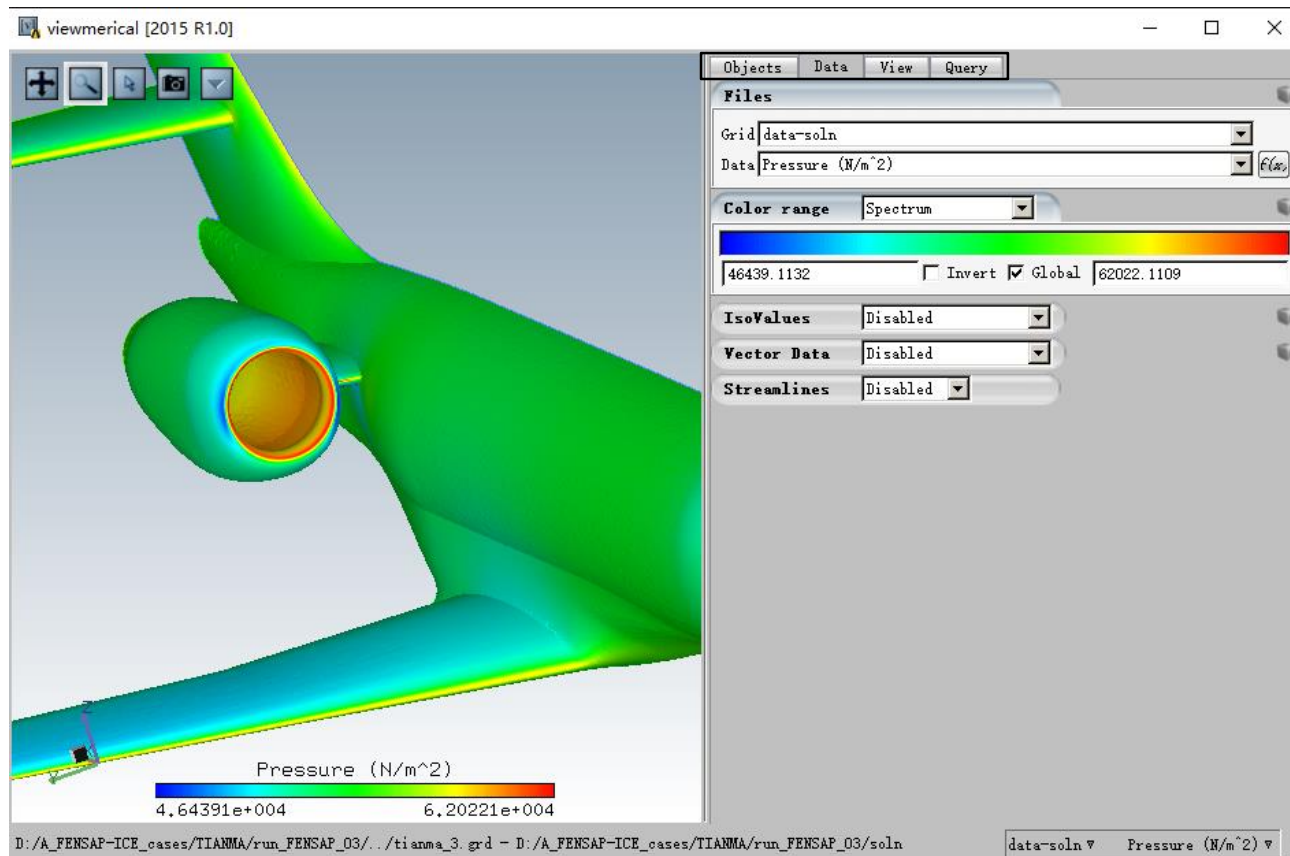
批量计算

迭代步数

日志显示

残差显示

# FENSAP-ICE图形界面 – Viewmerical



对象选择

结果展示

显示选项

二维图线



# 报告内容

飞行结冰基础知识

**FENSAP-ICE介绍**

模块组成

图形界面

**新版本改进**

# FENSAP-ICE新功能

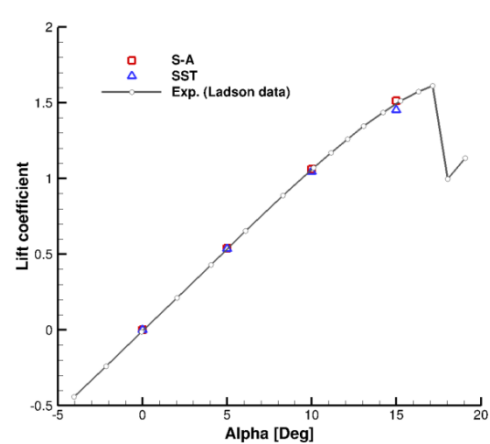
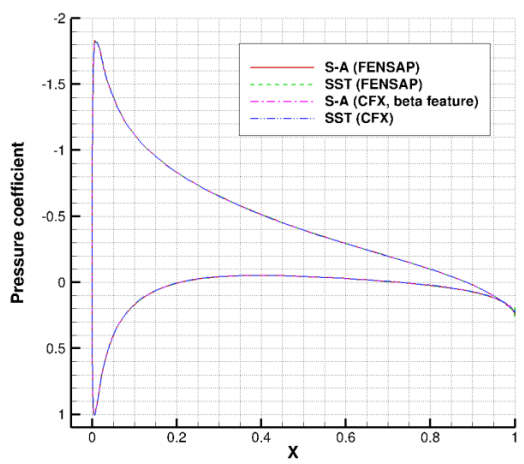
- ◆ 美国ANSYS公司于2015年初收购了加拿大NTI公司，FENSAP-ICE也成为了ANSYS流体解决方案的重要组成部分。
- ◆ FENSAP-ICE在飞行结冰领域的独特优势有效地补充了ANSYS的产品组合，同时ANSYS在CFD领域的深厚底蕴对FENSAP-ICE流场求解的鲁棒性、精度以及求解速度都有显著提升。
- ◆ 经过近一年开发，FENSAP-ICE发布了加入ANSYS的最新版本。

# FENSAP-ICE新功能

ANSYS

FENSAP:  $k-\omega$  和  $k-\omega$  SST 湍流模型

- 支持  $k-\omega$  和  $k-\omega$  SST 湍流模型
- 求解器收敛鲁棒性提高
- 新加湍流模型支持可变粗糙度（水珠模型）

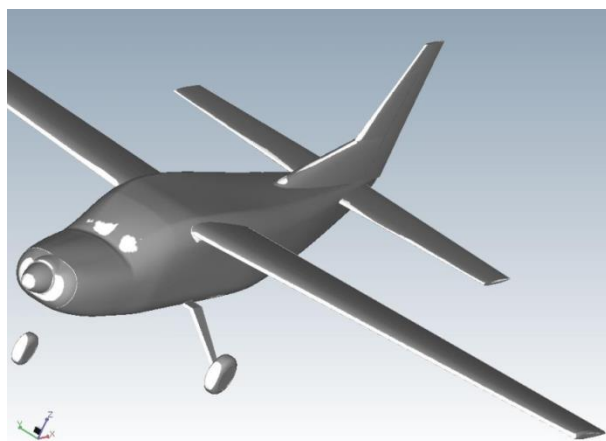


# FENSAP-ICE新功能

ANSYS

## ICE3D: 积冰增长算法提速

- 新开发算法使得表面节点移动和全机计算时间分别提高9倍和3倍。



2014R1.0

```

| energy of water impinged (kJ) = -.11197125E+03 |
| energy of init. water film (kJ) = 0.00000000E+00 |
| energy of final water film (kJ) = 0.00000000E+00 |
| energy of ice (kJ) = 0.99752451E+03 |
| energy of vapor (kJ) = 0.41214113E+03 |
| energy of convection (kJ) = 0.47341192E+03 |
| energy of radiation (kJ) = 0.17608059E-06 |
| energy of conduction (kJ) = 0.00000000E+00 |
| energy of clipped film (kJ) = 0.14063283E-03 |
| energy of runback flux (kJ) = -.19043418E-20 |
| energy balance (kJ) = -.44707213E-11 |

```

Wall time for the main loop: 189,515 s.

... subroutine icelter ends ...

```

| PE of memory used (peak) = 1985.98 |
| PE of memory after initialization = 1879.35 |

```

```

... subroutine icemain ends ...
... subroutine postprc begins ...
... subroutine postprc ends ...

```

2015R1.0

```

| energy of water impinged (kJ) = -.11197125E+03 |
| energy of init. water film (kJ) = 0.00000000E+00 |
| energy of final water film (kJ) = 0.00000000E+00 |
| energy of ice (kJ) = 0.99752414E+03 |
| energy of vapor (kJ) = 0.41214083E+03 |
| energy of convection (kJ) = 0.47341192E+03 |
| energy of radiation (kJ) = 0.17608059E-06 |
| energy of conduction (kJ) = 0.00000000E+00 |
| energy of clipped film (kJ) = 0.14063283E-03 |
| energy of runback flux (kJ) = -.23848213E-20 |
| energy balance (kJ) = 0.27015357E-12 |

```

Wall time for the main loop: 63,586 s.

... subroutine icelter ends ...

```

| PE of memory used (peak) = 1985.98 |
| PE of memory after initialization = 1879.35 |

```

```

... subroutine icemain ends ...
... subroutine postprc begins ...
... subroutine postprc ends ...

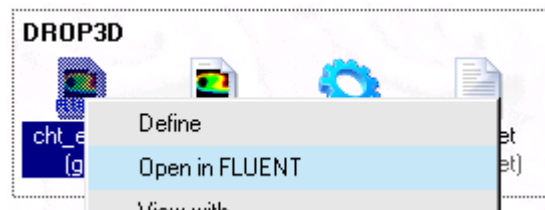
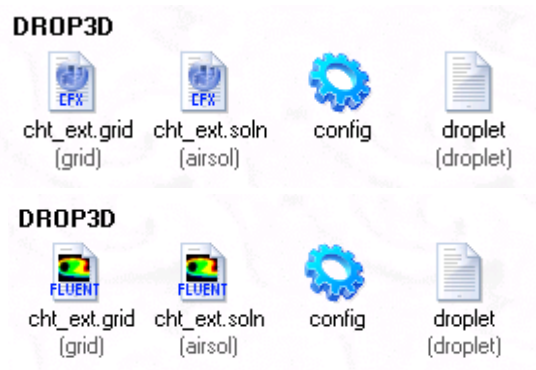
```

# FENSAP-ICE新功能

ANSYS

与ANSYS集成

- FLUENT和CFX网格、结果文件可轻松指定作为FENSAP-ICE输入。
- 所有设置、文件转化均可自动完成（周期性、边界、参考条件等）。
- 可启动原求解器查看相应设置



# FENSAP-ICE新功能

ANSYS

与ANSYS集成

- CFD-Post: 可设置为默认后处理工具



- FLUENT: 完整支持FLUENT作为流场求解的CHT3D防冰模拟，支持基于压力、密度求解器；网格流场可输出为FLUENT格式。



ANSYS中国技术大会  
中国·上海

感谢聆听