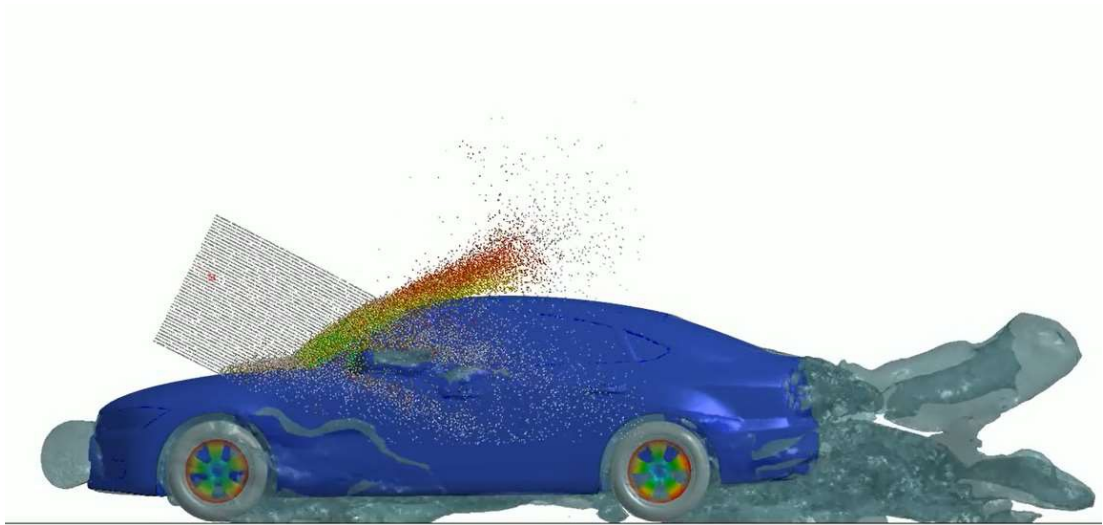


LS-DYNA[®] ICFD 白皮书



2019年6月

第一版

上海仿坤软件科技有限公司

(**LS-DYNA China**)

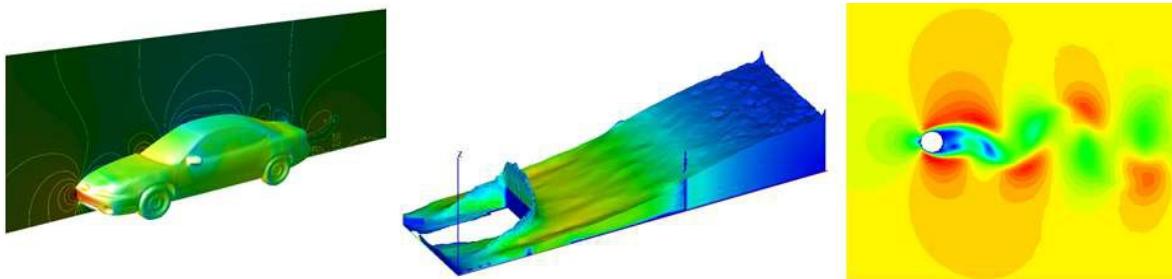
目录

| | |
|-----------------------------|----|
| 不可压缩流 ICFD 求解器..... | 4 |
| 一、 LS-DYNA ICFD 基本功能 | 4 |
| 1. 自动体网格生成 | 4 |
| 2. 网格细化和自适应网格划分工具 | 5 |
| 3. 流体——结构耦合分析..... | 5 |
| 4. 自由表面分析..... | 6 |
| 5. 两相流分析..... | 6 |
| 6. 湍流模型 | 7 |
| 7. 共轭传热 | 7 |
| 8. 非牛顿流动..... | 8 |
| 9. MPP 可扩展性 | 8 |
| 二、 典型应用: | 9 |
| 1. 外部空气动力学 | 9 |
| 2. 内部空气动力学 | 9 |
| 3. 自由表面和两相流动 | 10 |
| 4. 流体结构相互作用..... | 10 |
| 5. 热问题..... | 11 |
| 三、 应用案例..... | 12 |
| 1. 汽车外流场..... | 12 |
| 2. 流固耦合 | 12 |
| 3. 心脏瓣膜模拟 | 12 |
| 4. 铸造模拟 | 13 |
| 5. 风力发电翼片外流场分析..... | 13 |
| 6. 液晃模拟 | 14 |
| 7. 海浪对桩作用 | 14 |
| 8. 热压板水冷分析 | 14 |
| 9. 牛顿流挤压分析 | 15 |
| 10. 返回舱入水分析..... | 15 |
| 11. 离心泵分析 | 15 |

12. 凸轮泵模拟 16

不可压缩流 ICFD 求解器

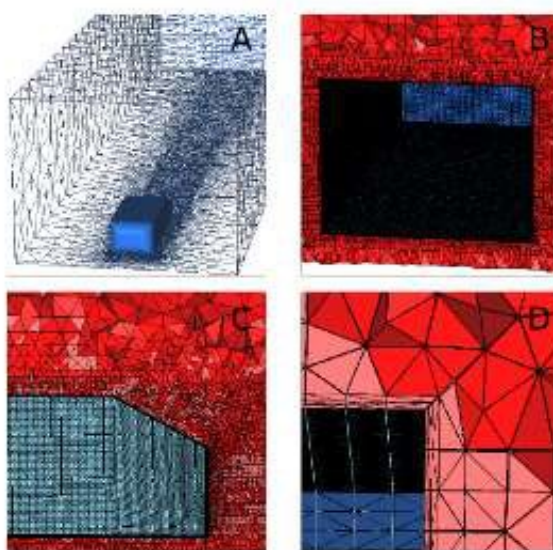
不可压缩流动求解器基于应用于流体力学的现有有限元技术。它与固体力学求解器完全耦合。FSI 耦合分析，允许通过显式技术进行稳健的弱 FSI 耦合分析，或使用隐式进行强 FSI 耦合分析。除了能够处理自由表面流动之外，使用保守的水平集界面跟踪技术,还可进行双相流分析功能。还支持基本湍流模型。本求解器是 LS-DYNA 中第一个应用新的体网格划分器，它只需将流体域边界的高质量表面网格作为输入，然后由程序自动生成体网格。另外，在随着不可压缩流的时间推进期间，求解器将自适应地重新网格化输入求解器特点。网格划分器的另一个重要特征是能够创建边界层网格。当在流体壁附近计算剪切应力时，这些各向异性边界层网格是模型求解关键。



一、LS-DYNA ICFD 基本功能

1. 自动体网格生成

ICFD 求解器使用自动体网格器划分流体域。这极大地简化了前处理阶段，而且，提供高质量的表面网格。对于 FSI 流-固耦合分析，求解器使用 ALE 方法进行网格移动。在 FSI 模拟导致大位移的情况下，求解器可以自动重新网格化以保证可接受的网格质量。

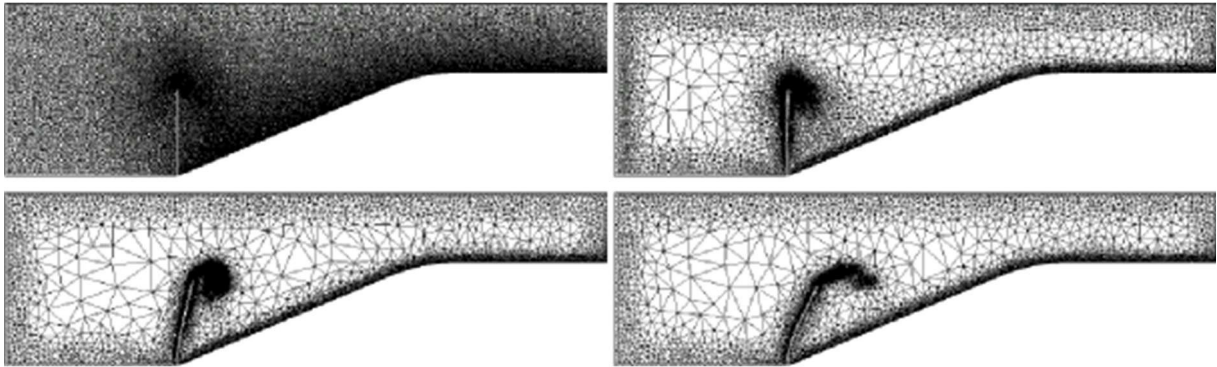


2. 网格细化和自适应网格划分工具

提供了几种工具用于细化局部体网格，以便更好地捕获网格敏感现象，例如湍流涡流或边界层分离和再附着。在几何体设置期间，网格划分器可以根据用户指定曲面，生成体积内的局部网格尺寸。如果没有使用内部网格来指定大小，则网格器将使用封闭体的表面大小进行线性插值。

为了能更好的模拟壁面效应，还可以添加一些各向异性的边界层网格。

另一种可能性是激活自适应网格细化特征。求解器将使用后验误差 (a-posteriori error) 估计器来计算由用户界定的新网格大小，以满足最大感知全局误差。这将简化网格生成，同时提供准确的结果。



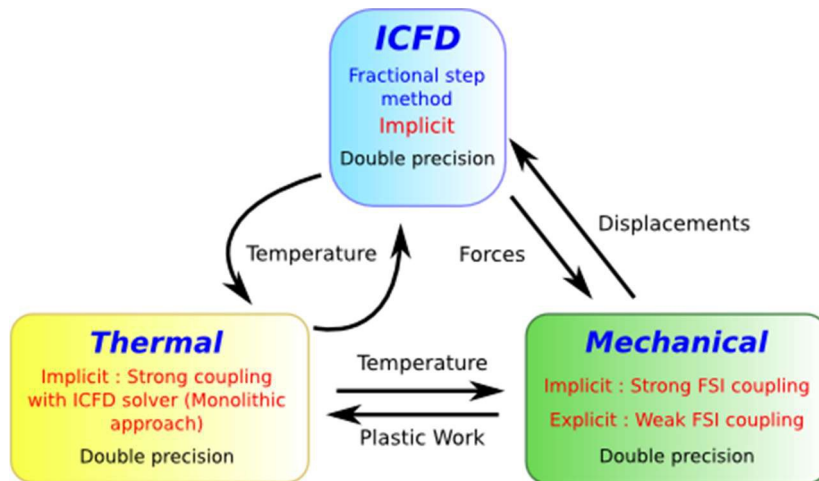
3. 流体——结构耦合分析

本求解器的主要目标不仅是解决 Navier Stokes 方程，而且希望解决完全耦合的 FSI 流-固耦合问题，其中结构部分可以是 LS-DYNA 的任何拉格朗日模型。因此，力学问题的设置与传统的 LS-DYNA 分析相同。所有 FSI 流-固耦合边界都是拉格朗日变形，其结构允许精确地施加边界条件。结构力学的显式和隐式求解器都可以被激活使用，从而可以实现弱 FSI 流-固耦合分析或强 FSI 流-固耦合分析。FSI 分析有三种耦合方向：

双向耦合。载荷和位移通过 FSI 接口传递，解决了完整的非线性问题。

单向耦合。固体力学求解器将位移传递给流体求解器。

单向耦合。流体求解器将应力传递给固体力学求解器。

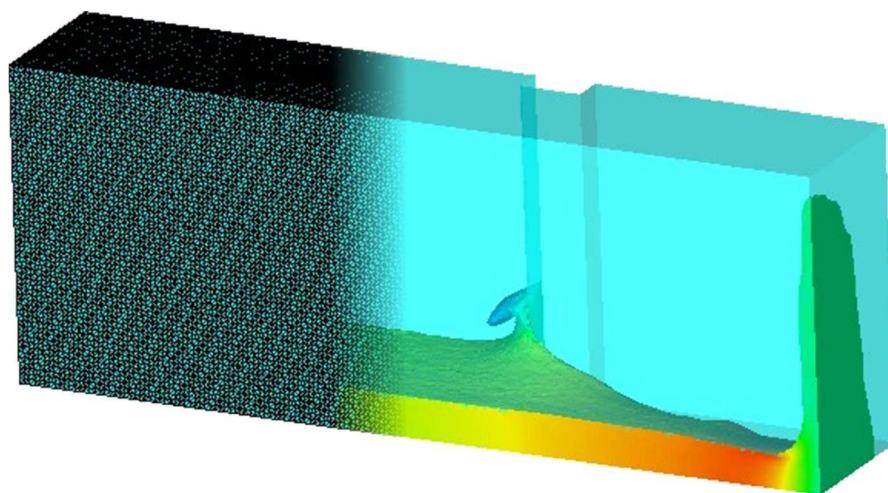


4. 自由表面分析

大量流体问题涉及移动界面。应用包括空气 - 水动力学，破坏表面波和穿透流体的固体。在以上这样的应用中，界面动力学与周围流体运动之间的相互作用是微妙的，诸如密度比和界面上的温度突变因素，表面张力效应，拓扑连通性和边界条件等因素在动力学中起重要作用。

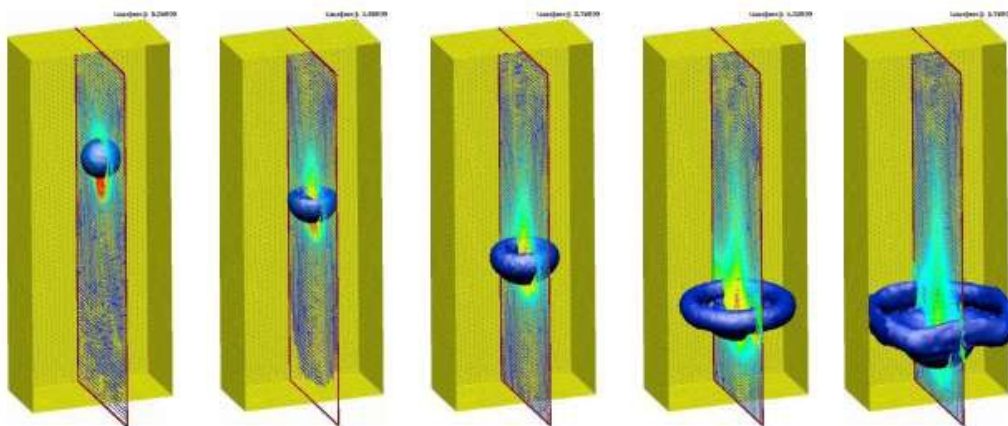
求解器使用水平集方法，一种快速可靠的技术，以便跟踪并正确表征移动界面。它们依赖于界面的隐式表征，其运动方程在数值上使用由双曲守恒定律构建的方案近似。由此产生的技术能够处理这样的问题，其中演化界面的速度可能敏感地依赖于局部属性，例如曲率和法线方向，以及前和内部跳跃的复杂物理以及由界面位置确定的边界条件。

水平集方法特别针对多个空间维度中的问题而设计，其中演变界面的拓扑在事件过程中发生变化，并且对于存在尖角和尖点存在的问题也可适用。



5. 两相流分析

求解器的新增功能之一是可以近似两相流，即使对于 *under resolved* 的问题，也能保持清晰的界面。这种方法将在有限元网格 *under resolved* 的区域中保留界面的子网格特征，并且稍后在具有更好分辨率的网格区域中将该特征恢复到求解器。



6. 湍流模型

在高雷诺数流动的情况下，对于正确地再现涡旋现象，依赖湍流模型的选择，边界层层流到湍流过渡和其他湍流三维行为是至关重要的。以下几种湍流模型可用：

RANS 模型。 RANS 方程确定平均流量，但它们需要湍流模型来关闭它们。这些方程由不同的 RANS 模型提供，假设流动有不同的假设。不可压缩求解器提供 $k-\epsilon$ 模型，这是 CFD 中使用最广泛的湍流模型之一。

LES 模型。 随着计算机计算效率的提高，LES 模型已经成为一种流行的技术，以模拟湍流模型。这些模型基于以下的假设：大涡旋包含流动的大部分动能并且取决于几何形状，而较小的涡旋被认为更通用且独立于流动的几何形状。因此，LES 模型将对流动应用滤波器，直接解决大涡流，同时模拟较小的涡流。



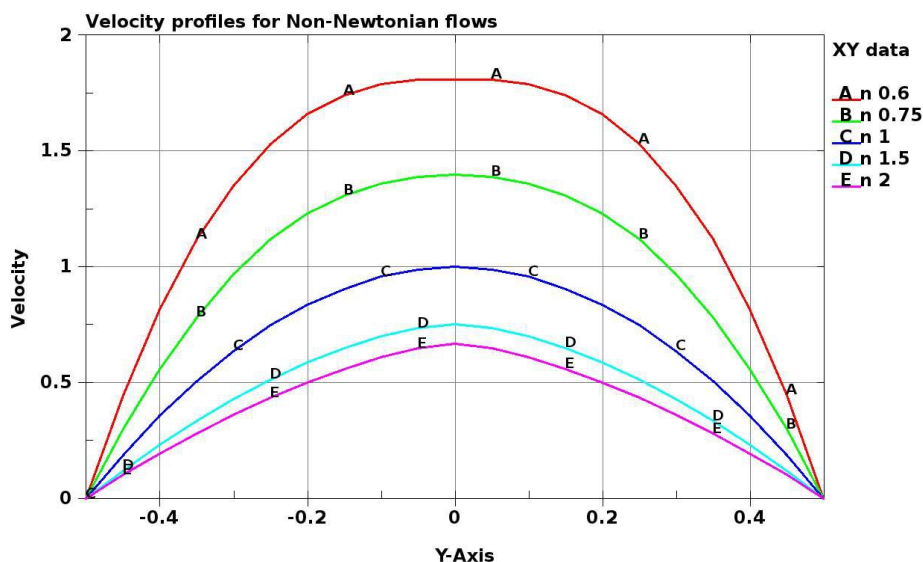
7. 共轭传热

传热是工程热力学问题，涉及物理系统间的热能和热量的产生、利用、转换和交换。ICFD 求解器提供了解决和研究流体温度流动行为的完美解决方案。潜在的应用很多，包括制冷，空调，建筑热负荷，电机冷却，除霜甚至人体内的热传递。此外，可以使用单一方法，让 ICFD 热求解器完全耦合热求解器，以便解决加热结构和流动一起相互耦合作用的复杂问题。



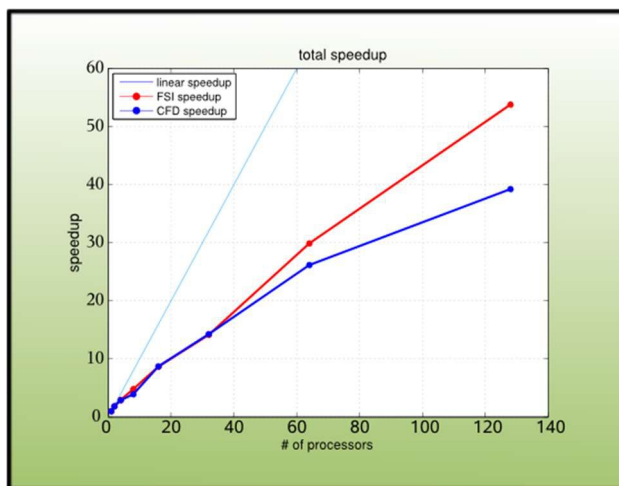
8. 非牛顿流动

传统的流体力学应用涉及使用与温度和剪切速率无关的恒定粘度的流动。据说这些流体遵循牛顿粘度定律，因此被称为牛顿流体（水，大多数水溶液，油，空气和其他气体）。然而，对于某些流体，这种假设并不成立。非牛顿流体的流动也在许多工程分支（物理化学，血液力学，发胶，玉米糖浆，欧不裂（oobleck））中遇到，并且经常在模拟管道中的流动时遇到。ICFD 求解器包括幂律模型，以模拟非牛顿流。



9. MPP 可扩展性

MPP(大规模并行处理的简称)是一种可用于 LS-DYNA 的计算方案,它使用许多独立的并行运行的 CPU,每个 CPU 都有自己的内存来执行单个分析。为了解决大的隐式 CFD 分析,提供良好的 CPU 可扩展性以加速分析并节省计算时间。作为独立的 CFD 模型,运行约 200 万自由度的数值模型。还对同一模型进行了 FSI 流-固耦合分析,使自由度总数达到约 350 万。考虑到 ICFD 求解器是隐式的,结果显示有良好的加速能力:在仅 CFD 情况下 128 cpus 加速比为 40,在 FSI 流-固耦合分析情况下为 128 cpus 加速比为 55。对于下一个开发周期,将会进一步的改进。

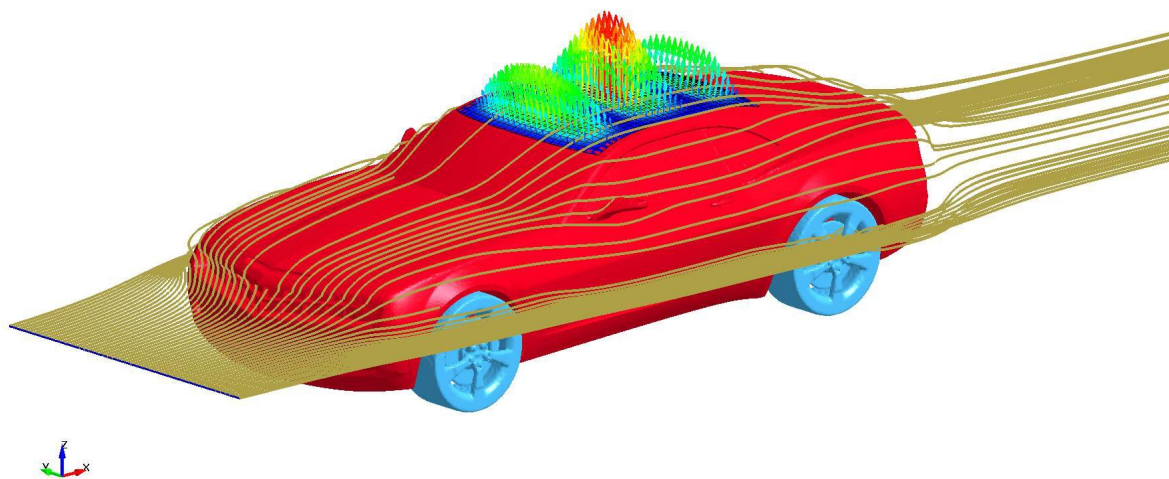


二、 典型应用：

1. 外部空气动力学

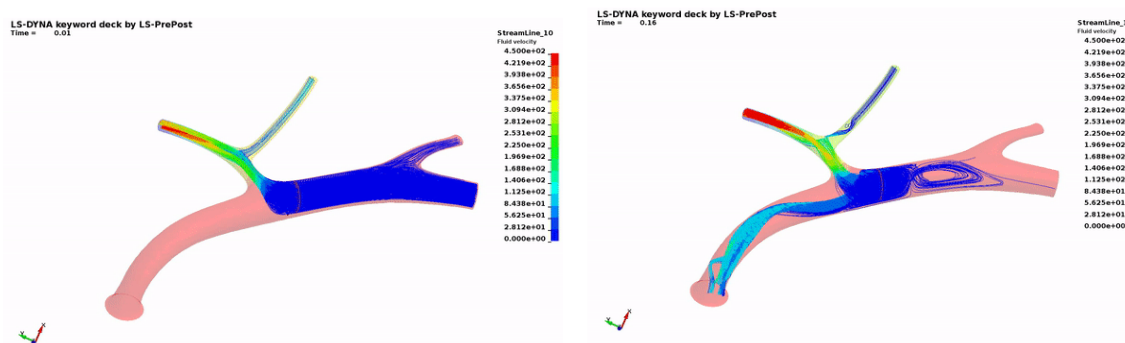
在流体力学中，外部流动是，边界层自由地发展，相邻表面没有施加约束的流动。因此，在边界层外总是存在流动的区域，其中速度，温度和/或浓度梯度可以忽略不计。它可以定义为完全浸没在其中的流体周围的流体流动。

工业中经常遇到外部空气动力学流动，其应用包括平板上的流体运动（倾斜或平行于自由流速度），弯曲表面上的流动，例如球形，圆柱形，翼型或涡轮叶片，空气在飞行器周围流动，地面车辆或水流动。



2. 内部空气动力学

在流体力学中，内部流动是流体被表面限制的流动。因此，边界层无法在不受约束的情况下发展。内部流动典型应用于化学过程，环境控制和能量转换技术的加热和冷却流体的适宜几何形状。因此，应用包括管道，管道，空气导管，空腔，喷气发动机或风洞中的流动。

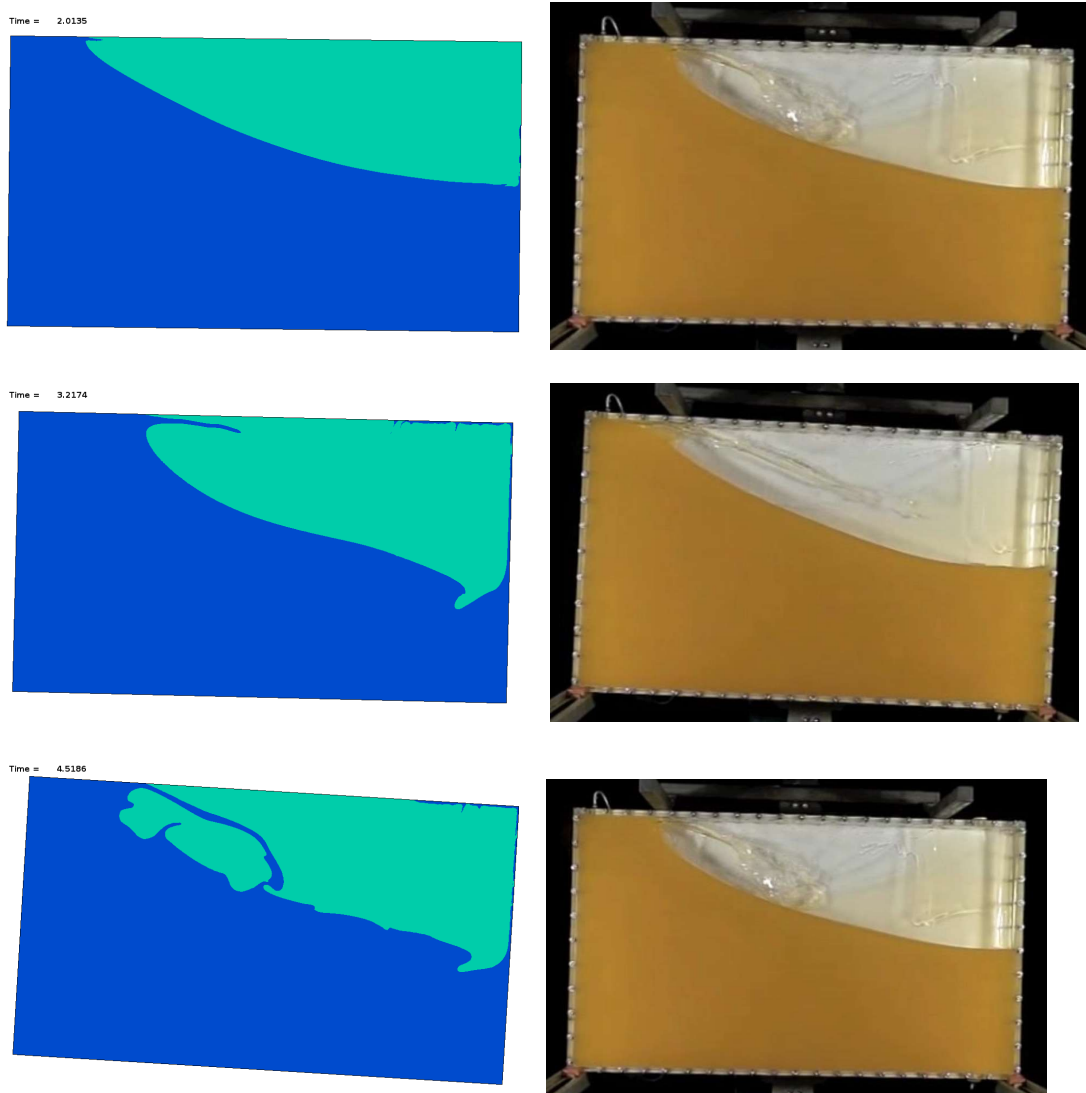


3. 自由表面和两相流动

在物理学中，流体的表面是自由表面，其受到恒定的垂直法向应力和零平行剪切应力，例如两个均匀流体之间的边界。

涉及自由地表流的应用在海洋工程中很多应用，以解决诸如晃动，波浪冲击或研究船体对水的影响等问题。自由表面特征还涵盖了广泛的工程应用，例如大坝溃坝，海上采油平台支柱的侵蚀或两种不同物理性质的流体的混合。

在所有流体力学应用领域中的各种工业应用中发生两相流现象。航空航天，汽车，核应用等。在所有这些领域中，预测两相行为非常重要。内燃机中液体喷雾的预测以便更好地控制燃烧过程并有助于减少污染物排放。另一个重要的例子包括流体混合，循环系统内的蒸汽平衡等。



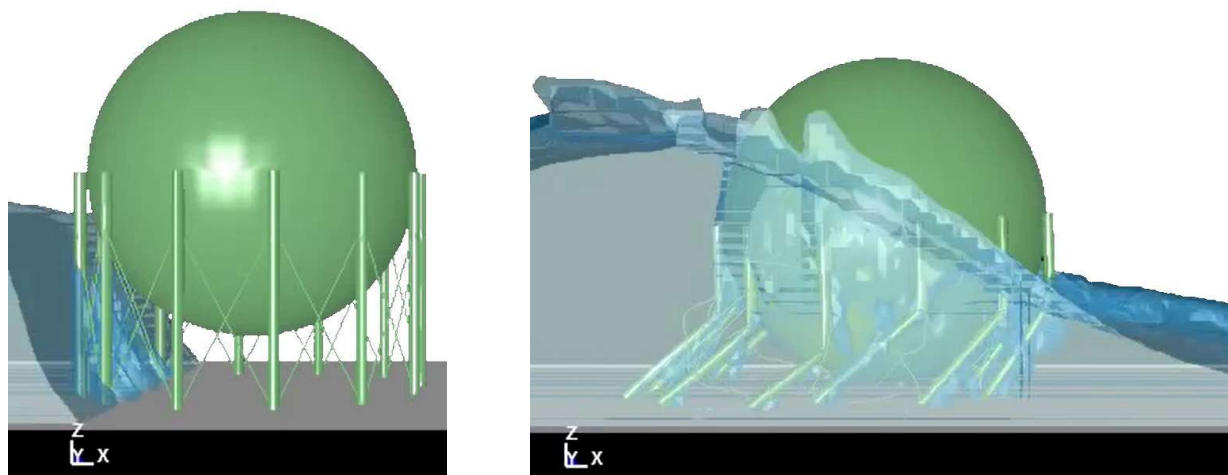
4. 流体结构相互作用

每当结构上的流动引起变形时，在物理学中就会发生流体结构相互作用问题，这反过来又可能影响流体

的行为方式。为了精确地表示这些相互作用，流体部分和结构部分在耦合系统中发展，其中施加在固体上的流体力学和通过流体的固体位移在每个时间步骤相互作用。

这开启了广泛的分析和应用，例如航空航天和涡轮机械行业的飞机机翼，翼型或涡轮叶片的疲劳，襟翼，桥梁或类似结构的舞动，振动和颤振的研究，用于生物医学工业的人工心脏瓣膜开口或其他假体的分析等。

求解器的主要特征之一是，通过使用 LS-DYNA 的固体力学部分的隐式求解器来触发，实现强大的强 FSI 耦合。



5. 热问题

传热是热能工程学科，涉及物理系统之间的热能和热量产生，使用，转换和交换。对于这里讨论的热问题，解决了描述热量分布（或温度随时间的变化）的热方程。因此，温度与流体方程（默认）分离，或者博欣内斯克（Boussinesq）近似可用于模拟浮力驱动流（也称为自然对流）。

热问题的潜在应用很多，包括电阻加热，辐射加热，蒸发器，冷凝器，空调系统，冲压以及更多的共轭传热应用。

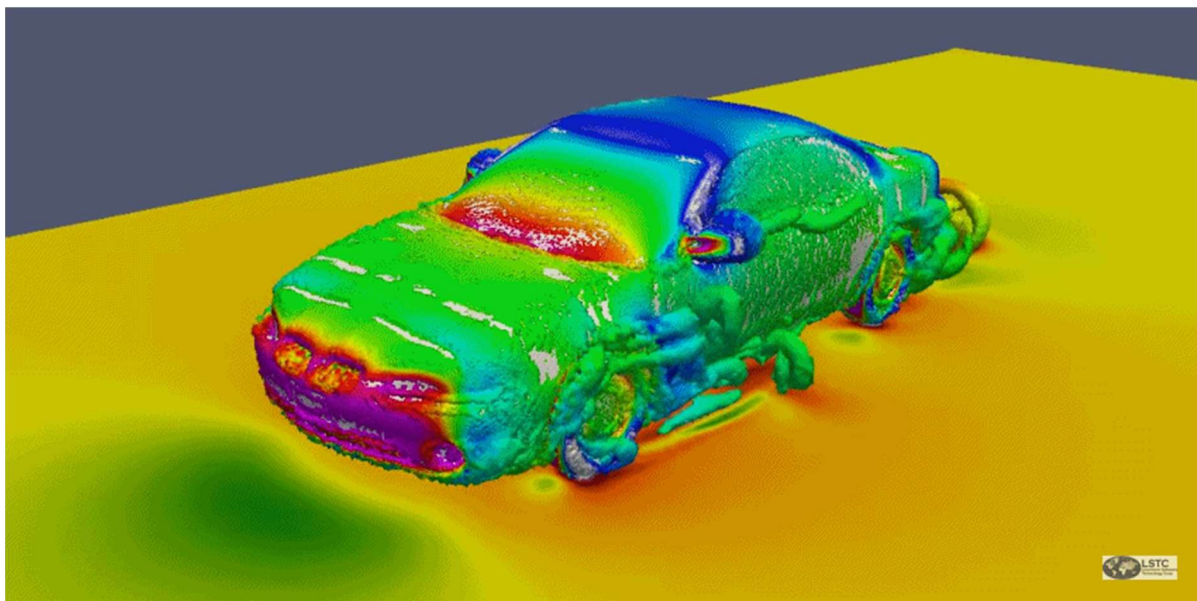


三、应用案例

ICFD 求解器可以作为独立求解器运行，也可以与 LS-DYNA 的固体力学和热求解器完全耦合，以解决复杂的多物理问题，例如在风中摆动的襟翼，气流在车辆周围拖曳或任何类型的钝体，俯仰运动或静止，心脏瓣膜的行为，波浪冲击，碎击问题等。

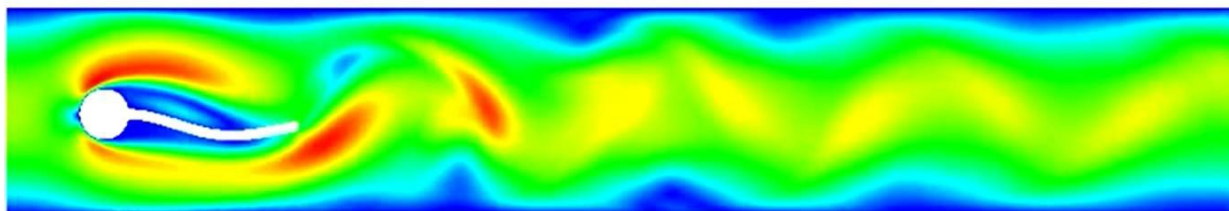
1. 汽车外流场

描述：ICFD 求解器的经典应用是研究诸如汽车或其他类型车辆的阻流体周围的湍流和阻力



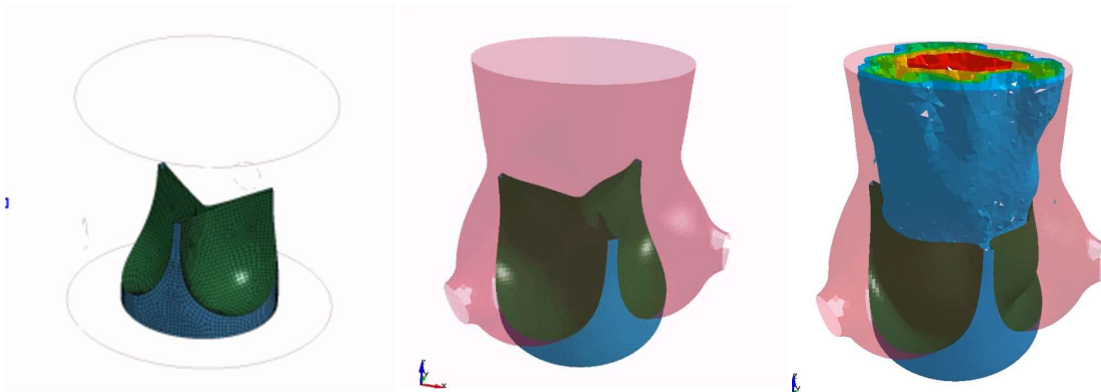
2. 流固耦合

描述：“Turek”问题是具有挑战性的流体结构相互作用 (FSI) 基准应用。在圆柱体后面形成的 Von Karman 涡街与柔性旗帜相互作用。在稳定状态下，观察到周期性振荡。在通道中发生标志的大变形，这导致流体域的频繁自动重新网格化。还有一种情况是固体密度和流体密度可能相等，这通常会在 FSI 情况下产生严重的不稳定性。因此，验证 LS-DYNA 中可用的强 FSI 耦合是一个很好的问题。



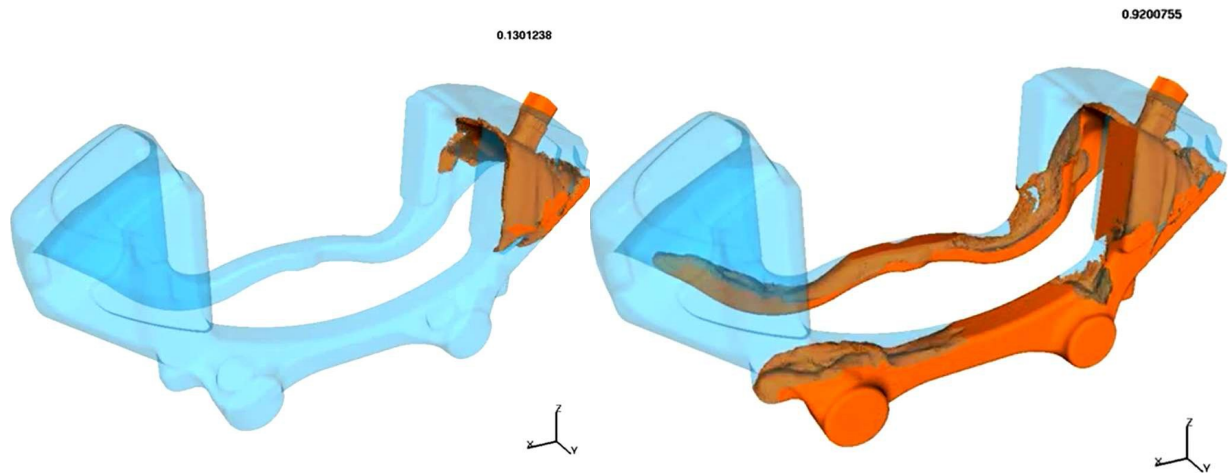
3. 心脏瓣膜模拟

描述：这个血流动力学实例突出了 ICFD 求解器的最强 FSI 能力。由于压力差，心脏瓣膜小叶打开以允许血液流动。然后，强烈的反压迫使它们再次关闭，血流量减少。由魁北克麦吉尔大学的 Mohammad Hossein 提供。



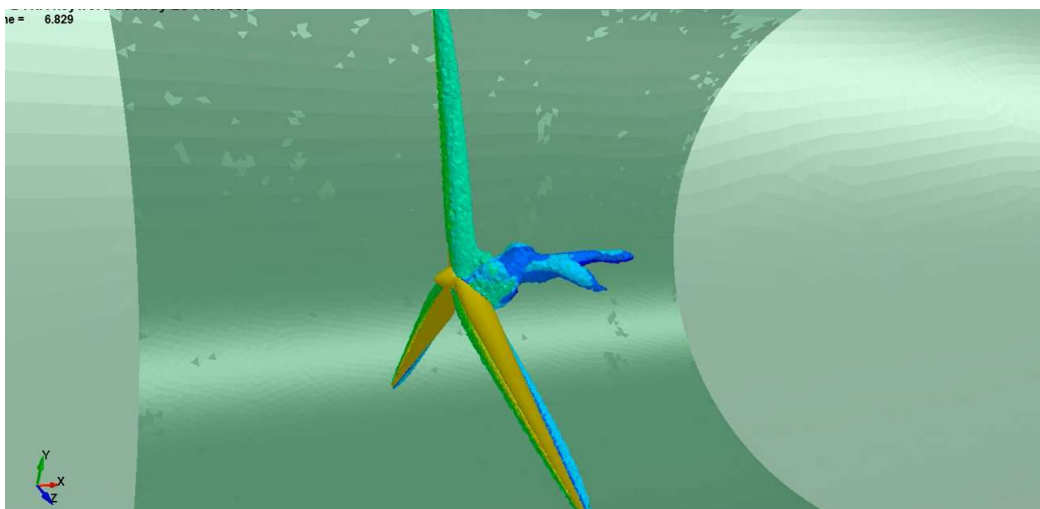
4. 铸造模拟

描述：这个例子的特色是一个 3D 模具填充腔，其中流体逐渐地填充固体形状。该问题可以被视为使用与 LS-DYNA 热解算器的强耦合的共轭传热问题。



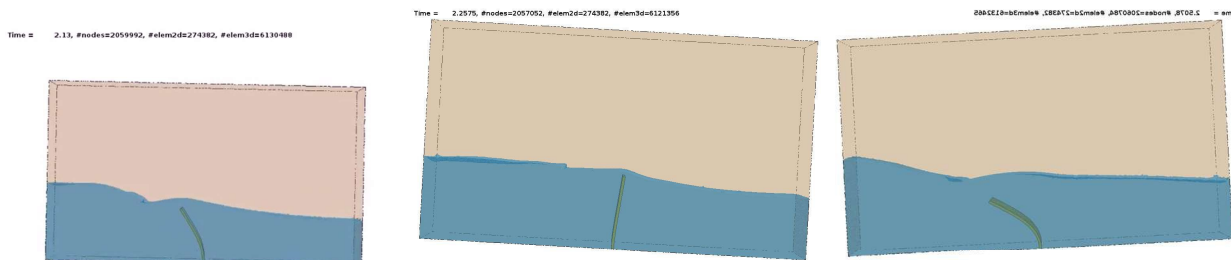
5. 风力发电翼片外流场分析

描述：该流体 - 结构相互作用示例使用非惯性参考系来描述水平风力涡轮机（HAWT）周围的流动。



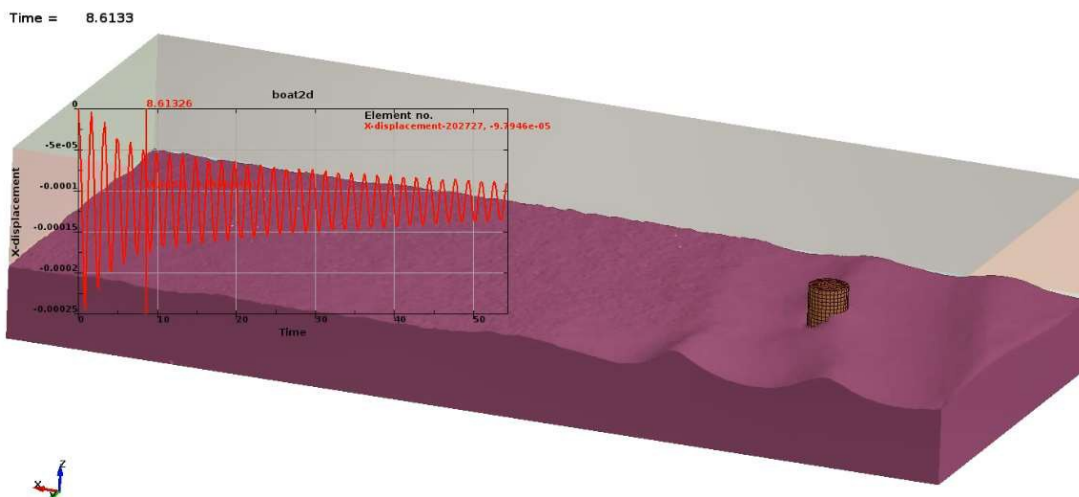
6. 液晃模拟

描述：这个 3D 验证问题结合了晃动和流体 - 结构相互作用。它基于 E.Botia-Vera, A. Souto-Iglesias, A. Bulian 和 L. Lobovsky 的实验设置，自由表面流动的三个 sph 小说基准测试案例，SPH 应用的第 5 个 ERCOFTAC SPHERIC 研讨会。为了解决这种情况，必须使用强 FSI 耦合。



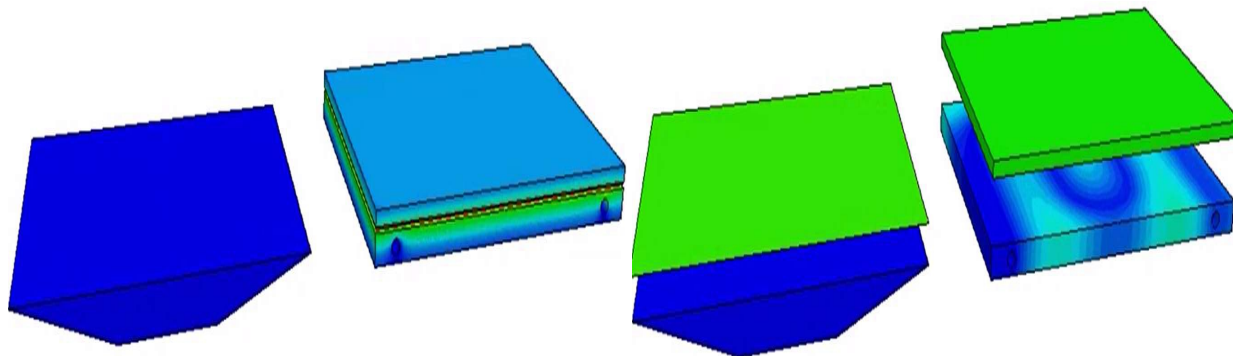
7. 海浪对桩作用

描述：自由表面流动冲击垂直圆柱体。问题达到稳定状态，气缸后面的波形保持不变。



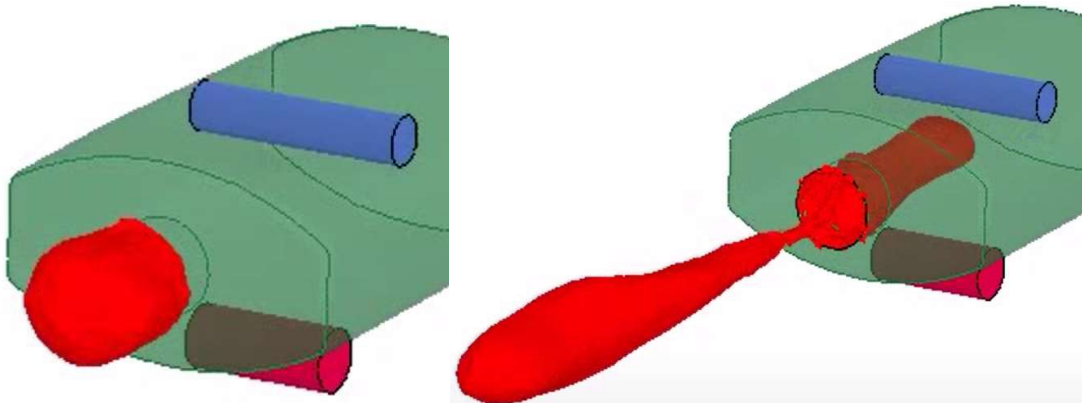
8. 热压板水冷分析

描述：本案例重申了涉及 FSI 和热耦合的冲压应用。将热板压在染料上。蛇形管嵌入模具中，冷却剂通过该管道，逐渐冷却模具和板。



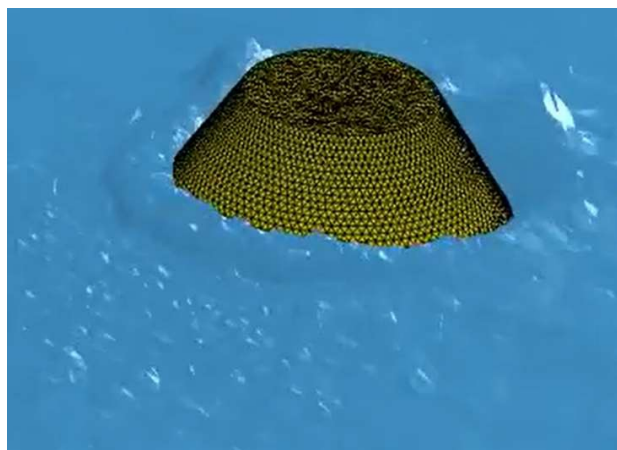
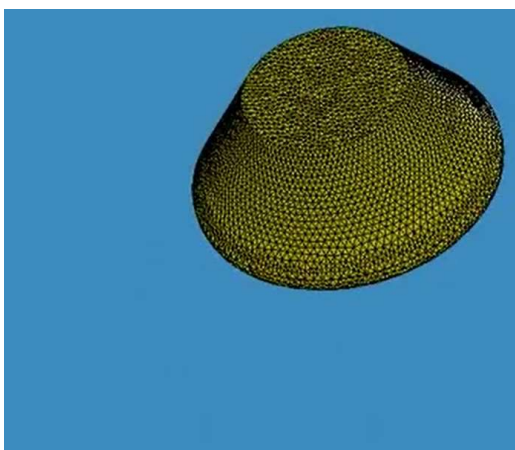
9. 牛顿流挤压分析

描述：从侧面挤压一个具有高粘性材料的瓶子。圆柱代表两个手指。该研究旨在分析释放手指力后重新进入瓶子的流量。



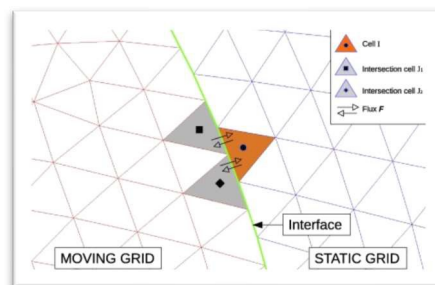
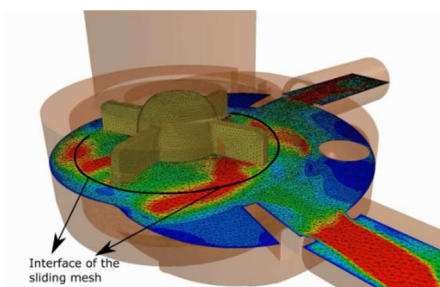
10. 返回舱入水分析

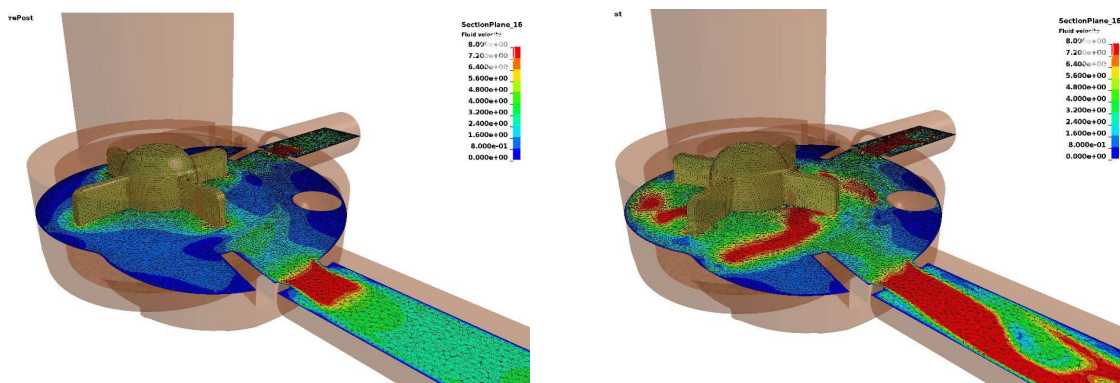
描述：以下案例显示了一个完全耦合的流体结构相互作用问题，其中一个自由下落的太空舱撞击着水。流体被建模为自由表面流动。



11. 离心泵分析

描述：离心泵是利用叶轮旋转而使水发生离心运动来工作的，LS-DYNA 提供了滑动网格可以很好的模拟泵轴带动叶轮和水做高速旋转运动，水发生离心运动。滑移网格是一个可以在不需要网格重划的情况下仿真瞬时旋转系统的技术。





12. 凸轮泵模拟

描述：凸轮泵采用两个同步运动的转子，转子由一对外置式同步齿轮箱进行传动，转子在传动轴的带动下进行同步反方向旋转，从而构成了较高的真空度和排放压力，特别适合医药级介质和腐蚀性高粘度介质的输送，LS-DYNA 提供高效的浸入式网格，很好的解决了流固交替界面网格划分的困难。沉浸法使用了不贴合边界的网格，简化了复杂边界形状的前处理过程。

