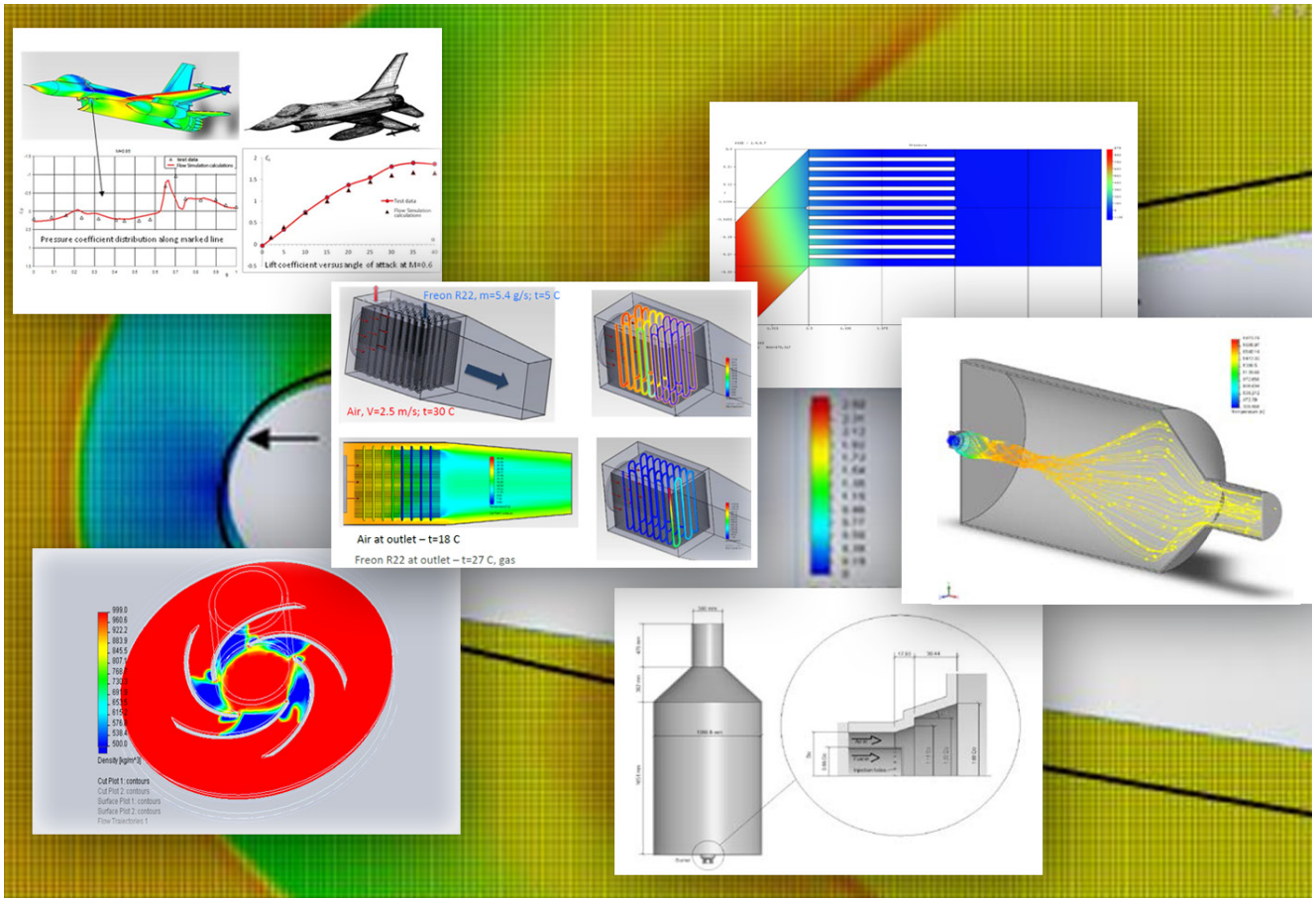
DASSAULT SYSTEMES

SOLIDWORKS

CAD 嵌入式 CFD 的数值基础

白皮书



2014 年 2 月

作者：
A. Sobachkin 博士
G. Dumnov 博士
（Mentor Graphics Corporation，机械分析部，俄罗斯）

A. Sobachkin 博士工程经理

主题

CAD/CAE 集成：网格化与在设计流程中集成分析

摘要

SOLIDWORKS Flow Simulation 是一款被称为并行 CFD（计算流体力学）分析软件，它完全嵌入机械设计环境中，适用于所有普通工程应用。

所有CFD软件都包括纳维-斯托克斯（Navier-Stokes）方程、湍流模型和物理现象模型的表示。自 20 世纪 80 年代早期以来，CFD 软件的复杂性日益增加，特别是在物理建模方面，但对处理几何复杂性的关注不多。与此同时，机械 CAD 系统已成为大多数工业部门中产品创建流程的主干，能够相对容易地构造非常复杂的几何体。1999 年，SOLIDWORKS 推出了第一版 FloWorks，首次在 MCAD 系统内提供 CFD 仿真功能，在 CFD 流程的起点无需修改就直接使用原始 CAD 几何体。自那时起，出现了大量 CAD 嵌入式和与 CAD 关联的工具。这些工具采用了与传统 CFD 不同的数值技术，包括网格生成、差分方式和壁处理等，但是其内部工作原理公开得不多。本文对 SOLIDWORKS Flow Simulation（前称为 FloWorks）的数值基础进行了深入探讨。

SOLIDWORKS Flow Simulation 选择的网格化技术以及选择笛卡尔网格对几何体处理方式所产生的影响，尤其是在实体-流体和实体-实体界面、用于捕捉边界层变化的壁处理、以及表面摩擦和热流量计算等方面。具体挑战包括薄壁和多层壳体的处理。

最后，我们指出了如何通过一组物理模型扩展线性网格和边界层模型，包括：真实气体、超音速和高超音速流、气体/预混合气体和非预混合气体燃烧、沸腾、气穴和凝固过程。还将简单介绍说明考虑光谱特性的辐射模型。

关键词

CAE，CFD，EFD，SOLIDWORKS Flow Simulation，CAD 嵌入式，网格，网格化技术，数值格式，解算器技术，工程分析，工程流体力学，多物理学。

1. 引言

在现代设计实践中，产品生命周期管理 (PLM) 理念被众多行业的工程师广泛用作整个产品生命周期内以及所有设计变更期间持续使用和维护 3D 制造产品数据的方式。PLM 理念的基础是作为机械 CAD 系统中心元素的高质量、完整、详细和精确的 3D 产品模型数据的可用性。3D 产品模型数据因此成为如今所有虚拟原型和物理仿真的基础和起点。在这样的 CAD 嵌入式环境中使用计算流体力学 (CFD) 流体仿真显然极具吸引力，因为在设计复杂度和对外部开发合作伙伴的依赖性不断增加的背景下，它不仅可以加快设计流程，还可以使这些流程更加可预测和可靠。需要说明一下，所有的主要 CAD 系统都已经被创建，并作为设计工具进行了优化。只是后来才认识到需要提供嵌入式 CAE（特别是 CFD）。此外，CAE 和 CFD 工具具有较长的历史，在此期间已针对其各自的任务对其进行了优化。因此，在某一阶段，CFD 继续独立开发是合乎逻辑的，并且与 CAD 的交互受到简单数据交换的限制。不过，从设计中使用 CFD 的角度来看，以及所有 PLM 路线图的要求来看，将 CFD 充分嵌入到 CAD 中的需求变得越来越迫切。在 20 世纪 90 年代末，首个完全嵌入的 CFD 产品 FloWorks，被作为 SOLIDWORKS 的插件开发出来，如今命名为 SOLIDWORKS Flow Simulation。

SOLIDWORKS Flow Simulation 的方法基于 2 个主要原则：

- 将原始 CAD 直接用作几何体信息的来源；
- 在网格分辨率不足以应对完整的 3D 仿真时，将完整的 3D CFD 建模与更简单的工程方法相结合。

在 CAD 系统 (SOLIDWORKS) 内运行的 SOLIDWORKS Flow Simulation 包括大量技术：

- CAD 数据管理；
- 网格生成；
- CFD 解算器；
- 工程建模技术；
- 结果处理

2. SOLIDWORKS FLOW SIMULATION 边界处理

CAD 描述了实体模型，而 CFD 主要关注流动空间（求解域减去实体模型）。在历史上，对于传统 CFD 软件，流体空间是在 CAD 系统内通过实体模型的布尔减创建的，而该反转的实体被传递到 CFD 工具进行网格化。传统 CFD 中的网格生成器通常是基于贴体算法。关于网格几何体基本类型的详细综述在多个出版物中有介绍（例如，Weatherill & Hassan，1994、Filipiak，1996 和 Parry & Tatchell，2008）。这些著作指出，贴体网格已被广泛用于解决工业问题。因此对于复杂的几何体一般使用非结构化网格，非结构化网格是通过构建不规则分布的节点形成的（参见图 1）。在被网格化的几何体复杂度较低的情况下，通常可能会使用结构化网格（参见图 2），并且这两种网格化策略可以结合起来，在一些子区域（如靠近壁）中使用结构化网格，而其他位置则使用非结构化网格（参见图 3）。这些网格可称为部分结构化或部分非结构化。

最初开发的 CAD 系统仅考虑了设计，未考虑数值仿真。贴体网格的特征是对 CAD 几何体的质量高度敏感（出于仿真目的，对设计并无必要）。通常从实体曲面的节点生成开始生成该类网格。然后通过 Delaunay 三角剖分对曲面进行网格化。之后，根据曲面三角剖分生成空间网格。通常，具有四面体单元的网格符合 Delaunay 准则（如，Delaunay，1934、Lawson，1977、Watson 1981、Baker，1989 和 Weatherill & Hassan，1994）。在很多情况下，曲面表示中的缺陷需要用户干预来解决歧义性问题，以修复 CAD 几何体中的缺陷。此外，在一些情况下，曲面的过度细化会导致小三角形的数量过多。这会发生在对流体仿真不那么重要的一些区域，因为针对一些几何特征（小半径、小尖端、材料接合处等）的网格化算法需要用户采取补救措施。

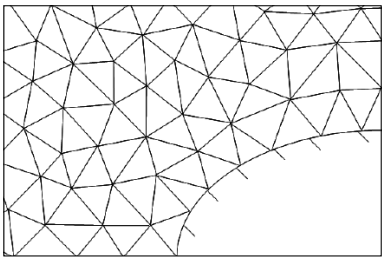


图 1：非结构化贴体网格

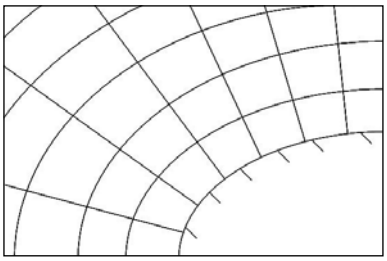


图 2：结构化翅片体网格

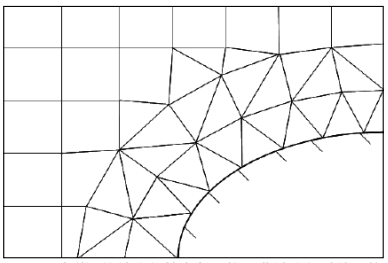


图 3：壁附近的结构化笛卡尔网格和非结构化贴体网格的组合

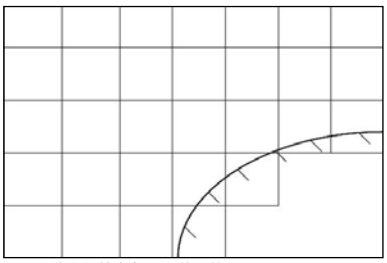


图 4：结构化笛卡尔浸润体网格

替代方法是使用浸润体网格，如图 4 所示。 在该方法中，网格创建开始时与几何体本身无关，单元可以与实体和流体之间的边界任意相交。这使得其可以使用笛卡尔网格，该网格在通常情况下无法贴体。此网格可被定义为一组相互邻接并与计算域的外边界相邻、沿笛卡尔坐标定位的立方体（矩形单元）。与曲面相交的立方体（剪切单元）根据曲面定义的边界条件采用特殊方式处理，将在稍后说明。有必要指出的是，可对四面体和其他类型的单元采取浸润体网格方法（请参见 Löhner 等，2004），但在逼近精度和易于实施方面，更倾向于采用笛卡尔网格。

笛卡尔网格的优势总结如下：

- 网格生成算法的简单性、速度和可靠性，特别是在处理原始 CAD 数据时；
- 局部截断误差最少；
- 微分方法的可靠性。

SOLIDWORKS Flow Simulation 技术是基于笛卡尔网格的使用，并且网格化技术是用于 CAD 嵌入式 CFD 的 CAD/CFD 桥接的关键元素之一。

由于使用笛卡尔网格，我们拥有完全位于实体（实体单元）中的单元、完全位于流体（流体单元）中的单元、以及与浸润边界相交的单元（我们称之为"局部单元"）。在最简单的情况下，局部单元包含 2 个控制体 (CV)：一个流体 CV 和一个实体 CV（参见图 5）。

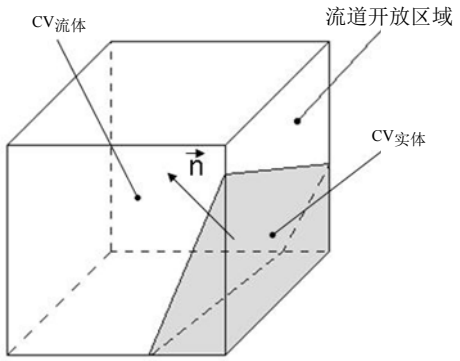


图 5：最简单情况下的局部单元，内部含有 2 个控制体 (CV)。

每个 CV 为完全的实体或完全的流体。对于每个 CV，计算所有必要的几何参数，如单元中心的数量和坐标。计算包围 CV 的面片的面积和法线向量方向。所有这些数据均从原始 CAD 模型中直接取得。此外，直接使用原始 CAD 模型允许指定局部单元内几何体的所有方面（例如实体边）—— 参见图 6。 在这里，CAD/CFD 桥接技术考虑了实体边上的 C1 C2 点，以便在网格表示中描述 2 个面：A1-C1-C2-A2 和 B1-C1-C2-B2，它们与 CAD 模型中的 2 个面精确对应。

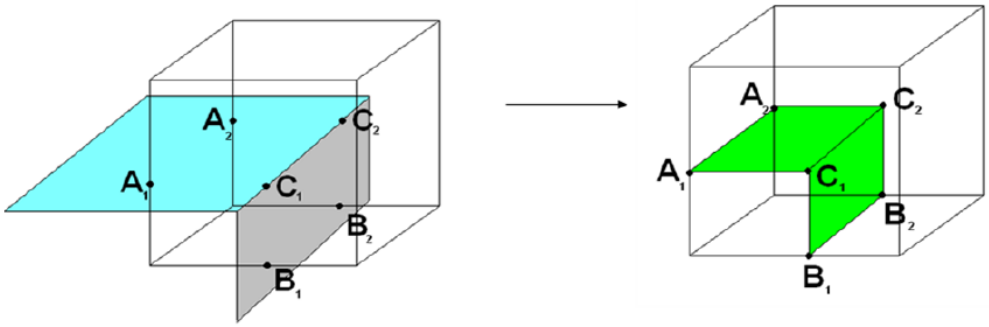


图 6：局部单元（右）中的 CAD 几何体表示（左），一个单元内含有 2 个面和实体边。

该技术允许对几何体特征进行良好求解，即使是在相对粗糙的网格中（参见图 7）。

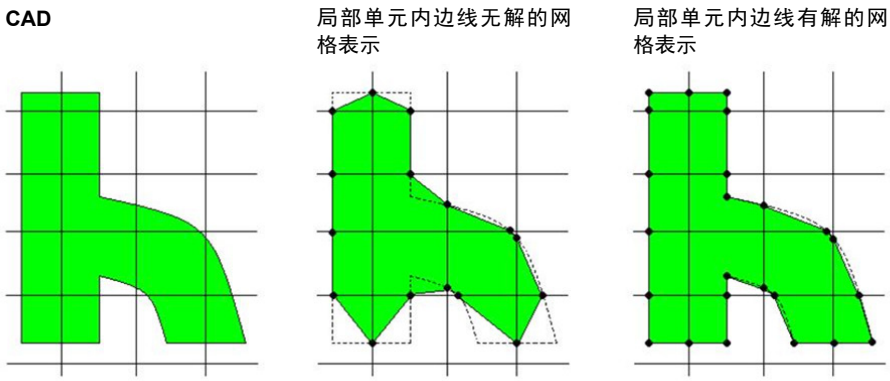


图 7：在局部单元内实体边线有解的 CAD 几何体网格表示。

在一个单元内，可能有任意数量的 CV：如果是一个薄壁则为 3 个或更多，如图 8 所示。

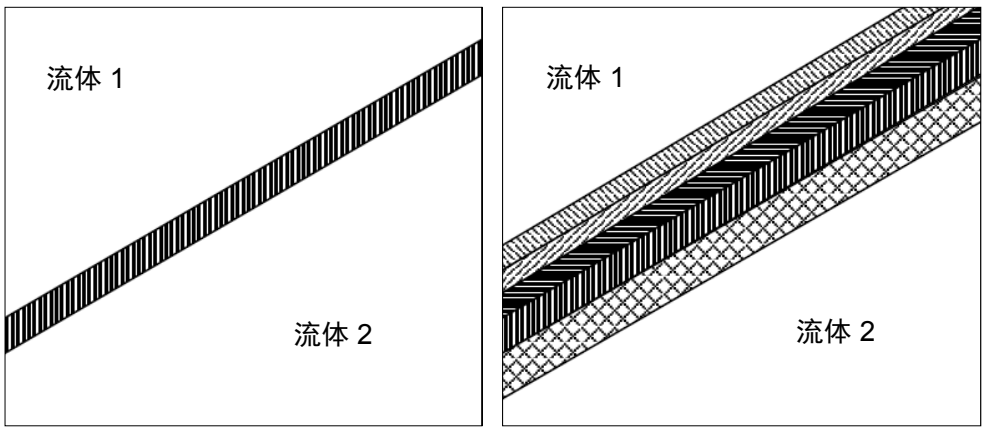


图 8-9：在薄实心壁情况下具有 3 个控制体（流体-实体-流体）的局部单元，以及在内有 5 层不同材料属性的薄实心壁情况下具有 7 个控制体的局部单元。

多层 CV 不仅对流体建模、也对热传递现象至关重要，包括实体内的接触阻力和焦耳热计算（完全耦合的多物理学应用）。在每个单元内，实体和流体 CV 可多次交替出现，如图 10 所示。

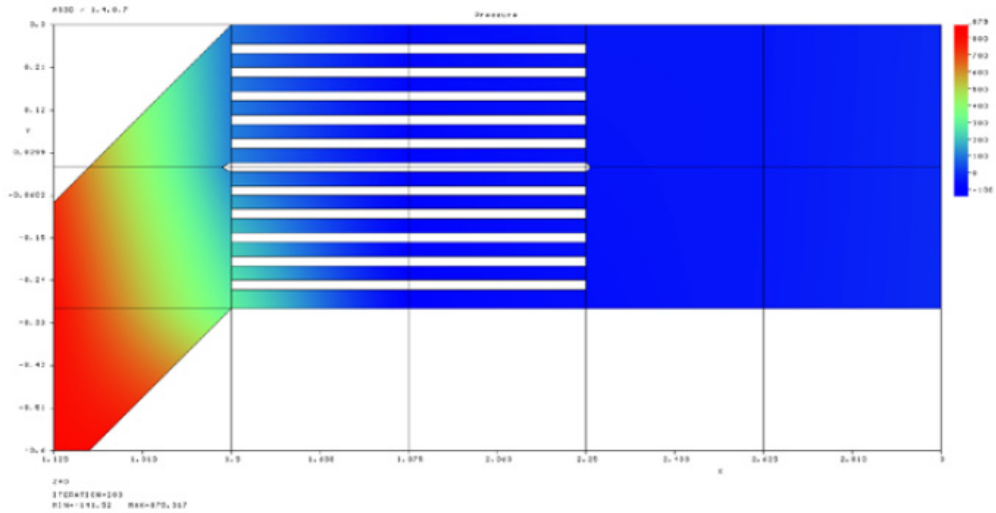


图 10：局部单元的多个控制体（实体-流体-实体-流体-.. 等）。

网格生成是从将矩形计算域划分成一组由与坐标轴平行的平面所围成的矩形单元（立方体）开始的。使用为每个实体定义的各种适应性标准（曲率、窄道、细小特征等）可以细化网格（将每个立方体分割成 8 个几何形状相似的立方体），此外还可根据求解中的梯度自动细化网格。

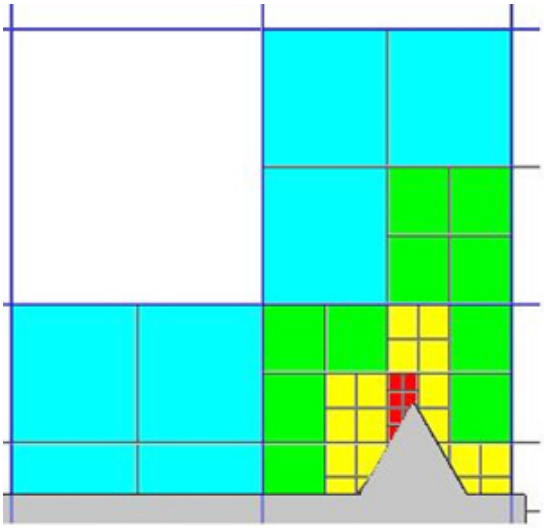


图 11：细化后的 SOLIDWORKS Flow Simulation 网格。

由于细化，形成了具有不同细化程度的单元，重要的是应注意 EFD 技术中相邻单元细化程度的差异不得大于 1，如图 11 所示。

这些细化步骤对于解决一些 CAD 几何体特征（如具有小曲率、细小特征和窄道等的曲面）来说至关重要。此外，使用该网格生成技术可以实现高效而可靠的自动网格化工具。所需的输入数据仅为几何物体的尺寸（可从 CAD 中自动取得）、要求解的最小特征的尺寸以及一些有关任务的通用信息（内部或外部流动、选择使用的物理模型等）。计算期间还可以激活额外的网格细化，旨在更好的调整网格以适应求解中的奇异性，如冲击波。

3. 物理模型

通常，SOLIDWORKS Flow Simulation 中使用的笛卡尔网格方法允许使用一个具有流体单元、实体单元和（多 CV）局部单元的计算网格执行共轭多物理学计算：

- 流体区域的流体流动分析；
- 实体区域的热传导和直接电流计算。

流体流动分析和热传导也可分开处理。此外，所有这些计算都可与不同的辐射模型耦合。对于这些物理现象，原始 CAD 几何体仍是初始的几何信息源。

1. 流体区域

在流体区域中，SOLIDWORKS Flow Simulation 求解纳维-斯托克斯方程，该方程是质量、动量和能量守恒定律的公式：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)+\frac{\partial P}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij}+\tau_{ij}^R)+S_i \tag{2}$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t}+\frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(u_j(\tau_{ij}+\tau_{ij}^R)+q_i\right)+\frac{\partial p}{\partial t}-\tau_{ij}^R\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\rho\varepsilon+S_i u_i+Q_H \tag{3}$$

$$H=h+\frac{u^2}{2}$$

为了计算高速可压缩流动和具有冲击波的流动，应使用以下能量方程式：

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t}+\frac{\partial \rho u_i\left(E+\frac{p}{\rho}\right)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(u_j(\tau_{ij}+\tau_{ij}^R)+q_i\right)-\tau_{ij}^R\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\rho\varepsilon+S_i u_i+Q_H \tag{4}$$

$$E=e+\frac{u^2}{2}$$

这些方程式由定义流体性质的流体状态方程式以及对流体密度、粘度和导热性的经验依赖关系进行补充。通过引入依赖于流动剪切速率和温度的动态粘度，可以支持无弹性的非牛顿流体。

使用特殊模型描述真实气体、体凝固和蒸发、气穴以及多孔介质。

SOLIDWORKS Flow Simulation 能够支持层流和湍流。在雷诺 (Reynolds) 数较小时发生层流，雷诺数等于速度和长度的乘积除以动力粘度。当雷诺数超出一定的临界值时，流动平滑过渡到湍流。为预测湍流，采用了法夫雷（Favre）平均纳维-斯托克斯方程。其中考虑了流动湍流对流动参数的时均影响，而直接考虑了大尺度时间相关的现象。通过此步骤，另一术语"雷诺应力"出现在方程式中，必须为其提供额外信息。要结束此方程组，SOLIDWORKS Flow Simulation 采用湍流动能及其消散率的传输方程，使用 k-ε 模型。

由 Lam 和 Bremhorst (1981) 提出的修正的具有阻尼函数的 k-ε 湍流模型，说明了均质流体的层流、湍流和过渡流包含以下湍流守恒定律：

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t}+\frac{\partial \rho k u_i}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right)+\tau_{ij}^R\frac{\partial u_i}{\partial x_j}-\rho\varepsilon+\mu_t P_B, \tag{5}$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t}+\frac{\partial \rho \varepsilon u_i}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right)+C_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k}\left(f_1\tau_{ij}^R\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+C_B\mu_t P_B\right)-f_2 C_{\varepsilon 2}\frac{\rho\varepsilon^2}{k} \tag{6}$$

$$\tau_{ij}=\mu\, s_{ij},\ \tau_{ij}^R=\mu_t\, s_{ij}-\frac{2}{3}\rho k\delta_{ij}\ ,s_{ij}=\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}-\frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}, \tag{7}$$

$$P_B=-\frac{g_i}{\sigma_B}\frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial x_i}, \tag{8}$$

式中，C_μ =0.09, $C_{\varepsilon 1}$ = 1.44, $C_{\varepsilon 2}$ =1.92, σ_k =1，σ_ε =1.3, σ_B =0.9, C_B =1 若 P_B >0, C_B =0 若 P_B <0, 湍流粘度根据以下公式得出：

$$\mu_t=f_\mu\cdot\frac{C_\mu\rho k^2}{\varepsilon}\ , \tag{9}$$

Lam 和 Bremhorst 的阻尼函数 f_μ 根据以下公式得出：

$$f_\mu=\left(1-e^{-0.025R_y}\right)^2\cdot\left(1+\frac{20.5}{R_t}\right), \tag{10}$$

式中：

$$R_y = \frac{\rho\sqrt{k}\,y}{\mu}, \tag{11}$$

$$R_t = \frac{\rho k^2}{\mu\varepsilon}, \tag{12}$$

y 是从点到壁的距离，Lam 和 Bremhorst 的阻尼函数 f1 和 f2 根据以下公式得出：

$$f_1 = 1 + \left(\frac{0.05}{f_\mu}\right)^3, \quad f_2 = 1 - e^{R_t^2}. \tag{13}$$

当基于平均脉动速度和到壁距离的雷诺数 Ry 变小时，Lam 和 Bremhost 的阻尼函数 f_μ, f_1, f_2 减少湍流粘度和湍流能量并增加湍流消散率。
当 $f_\mu = 1, f_1 = 1, f_2 = 1$ 时，该方向返回到原来的 k-ε 模型。

热通量由以下公式定义：

$$q_i = \left(\frac{\mu}{\mathrm{Pr}} + \frac{\mu_t}{\sigma_c}\right)\frac{\partial h}{\partial x_i}, \quad i = 1,2,3 \tag{14}$$

在这里，常数 $\sigma_c = 0.9$，Pr 是普朗特 (Prandtl) 数，h 是热焓。

特定计算任务最终由其几何体定义、边界和初始条件指定。该条件的所有数据均直接在原始 CAD 模型上定义。

2. 实体区域

SOLIDWORKS Flow Simulation 计算实体区域中的两类物理现象：热传导和直接电流，产生的焦耳热是能量方程式中的热源。

实体和流体中的热传递以及它们之间的热交换（共轭热传递）是 CAD 嵌入式 CFD 软件的关键和隐式元素。流体中的热传递由能量方程式 (3-4) 说明，其中热通量由 (14) 定义。实体介质中的热传导现象由以下方程式说明：

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\lambda_i \frac{\partial T}{\partial x_i}\right) + Q_H \tag{15}$$

式中 e 是特定比内能 $e = c \cdot T$，c 是比热，Q_H 是单元体积的比热释放（或吸收）率，λ_i 是热导率张量的本征值。假设热导率张量是所考虑的坐标系统中的对角线。对于各向同性介质 $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda$。如果存在电流，$Qh$ 可能包括焦耳比热释放 Qj。它被定义为 $Qj = r \cdot j^2$，其中 r 是电阻率，j 是电流密度。电流密度矢量：

$$\mathbf{i} = -\left(\frac{1}{r_{11}}\frac{\partial \varphi}{\partial x_1}, \frac{1}{r_{22}}\frac{\partial \varphi}{\partial x_2}, \frac{1}{r_{33}}\frac{\partial \varphi}{\partial x_3}\right) \tag{16}$$

通过稳态拉普拉斯方程中的电势 $\varphi[V]$ 得出：

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{1}{r_{ii}}\frac{\partial \varphi}{\partial x_i}\right)=0 \qquad (17)$$

在这里，r_{ii} 是 i-th 坐标方向与温度相关的电阻率。

在含有导电材料的子域内对拉普拉斯方程进行数值求解。该子域中的绝缘实体和流体区域被自动排除。曲面上的总电流 $I[A]$ 或电势 $\varphi[V]$ 可由用户指定为该问题的边界条件。

子域中两个导电实体之间的曲面被认为是零电阻（默认值）或用户可以在其上指定一个接触电阻。电阻值明确提供或直接从指定材料及其厚度中计算得出。曲面上指定的接触电阻是指通过曲面的电流产生相应的焦耳热，从而使曲面热源升高，如下所示。

如果一个实体包含几个相互连接的实体材料，则在计算热传导时需要考虑它们之间的热接触电阻。因此，实体温度梯度出现在接触曲面上。以相同方式计算实体中的热传导时可以考虑实体之间或与流体接触的实体上的极薄一层的其他材料（即，作为热接触电阻），但应通过材料的热传导和层厚来指定。

流体和实体介质之间的能量交换通过垂直于实体/流体界面的法向方向中的热通量来计算，考虑实体曲面温度和流体边界层特征以及辐射热交换（如有必要）。

3. 实体曲面之间和透明实体中的辐射

辐射是一个复杂现象，因此有很多简化的辐射模型。所有这些模型都有优点、缺点和限制。SOLIDWORKS Flow Simulation 包括 2 个模型：

1. 射线跟踪，也称作 DTRM（离散传输辐射模型）。
2. 离散坐标（DO）。

对于射线跟踪模型，来自实体曲面的热辐射，包括发射和反射，均假设为散射（对称和镜面辐射曲面类型除外），即：它们遵守朗伯定律。据此，每单位面积和每单位立体角的辐射强度在所有方向上均相同。曲面可吸收和反射太阳辐射，与热辐射无关。热辐射通过被指定为辐射透明的实体，不存在任何吸收。一个实体可被指定为仅对太阳辐射透明、或对太阳辐射以外所有热源的热辐射透明、或对热辐射和太阳辐射两种类型的辐射透明。此方案还可考虑折射。流体既不发射也不吸收热辐射（即：它们对热辐射是透明的），因此热辐射仅影响实体表面。未指定为黑体或白体的辐射实体曲面被假设为一个理想的灰体，即，具有与黑体相似的持续发射功率谱，因此其单色发射率与发射波长无关。对于具有特定曲面条件的特定材料，灰体发射率可取决于曲面温度。在射线跟踪模型中不考虑光谱依赖性。

离散坐标模型更加复杂。在这里，计算域内任何位置处的整个 4π 方向域被离散到特定数量的相等立体角中。辐射管理方程如下：

$$\frac{dI(\vec{s},\vec{r})}{ds} = -(\kappa+\sigma_s)\cdot I(\vec{s},\vec{r}) + \kappa\cdot n^2\cdot I_b(\vec{r}) + \frac{\sigma_s}{4\pi}\int_{\Omega=4\pi}\Phi(\vec{s}',\vec{s})\cdot I(\vec{s}',\vec{r})\cdot d\Omega' \quad (18)$$

辐射吸收（半透明）实体依据规定的实体材料的吸收系数吸收并发射热辐射。未考虑散射。不透明实体曲面依据规定的辐射系数吸收热辐射，其余入射辐射依据规定的镜面反射系数被镜面反射、漫射或同时被镜面反射和漫射。依据实体和相邻介质的规定的折射指数进行折射（对于其他辐射吸收实体或透明实体或流体，折射指数始终应等于 1）。辐射光谱被认为包含几个谱带，其边缘由用户指定。在各谱带中，辐射源、曲面和材料的属性被认为是常数。

由于辐射计算，在浸润流体-液体边界的部分单元中或在半透明实体内的实体单元中考虑适当的热通量。

4：边界层处理

非贴体笛卡尔网格适合于管理原始 CAD 数据，因而构成 CAD/CFD 桥接的基础。笛卡尔浸润体网格的主要问题在于对粗糙网格上的边界层进行求解。为此，SOLIDWORKS Flow Simulation 技术包含了以下所述的原始方法，并且该方法与 SOLIDWORKS Flow Simulation 笛卡尔网格技术的组合构成了 SOLIDWORKS Flow Simulation CAD/CFD 桥接的主要部分。

对近壁单元的考虑表明，对于任意的原始 CAD 几何体，实体/流体边界之间的网格对于高梯度边界层内的纳维-斯托克斯方程的精确求解过于粗糙。因此，为计算壁的表面摩擦和热通量，采用了针对边界层的普朗特方法。该方法的核心思想与传统上 CFD 使用的壁函数方法有一些相似。作为构成 SOLIDWORKS Flow Simulation 平台技术的一部分，壁处理采用新颖而原始的两尺度壁函数 (2SWF) 方法，该方法包含 2 种方法，用于将边界层计算与整体流的求解相结合：

1. 当越过边界层的单元数量不足以直接或简化确定流动和热曲线时使用"薄"边界层处理；
2. 当越过边界层的单元数量超出精确求解边界层的数量时使用"厚"边界层处理。
3. 在介于两者之间的情形时，综合采用了以上两种方法，以确保在细化网格时或边界层沿曲面增厚时两个模型之间能够平滑过渡。

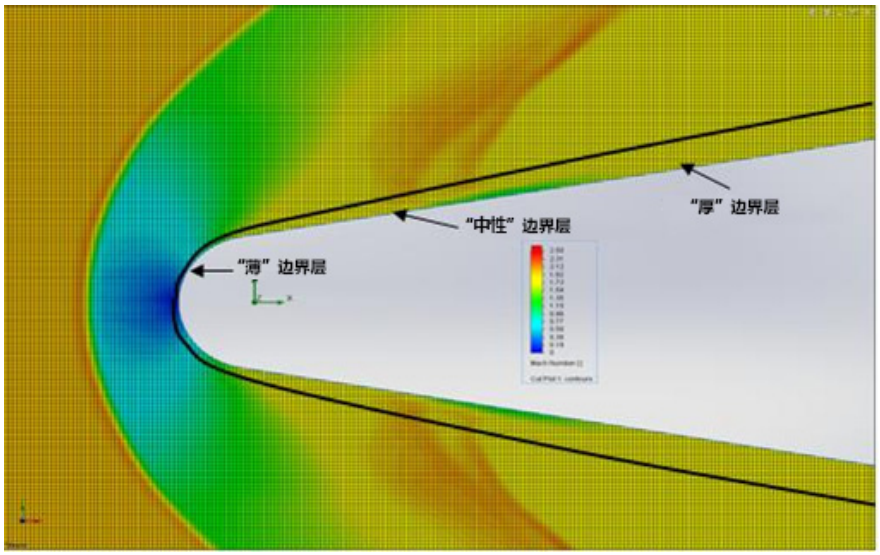


图 12：具有"薄"、"中性"和"厚"粘性边界层的马赫数流场。

对 SOLIDWORKS Flow Simulation 技术边界层处理的验证由 Balakine 等 (2004) 完成。这些处理将在下文讨论。

1. 薄边界层方法

在薄边界层方法中，已沿壁的法线方向（即沿体曲面坐标的法线方向）从 0（在壁处）到边界层厚度 δ 集成的普朗特边界层方程已沿覆盖壁的流体流线进行求解。如果边界层为层流，这些方程式均采用基于 Shvetz 试探函数技术的逐次逼近求解方法（Ginzburg，1970）。如果边界层为湍流或过渡流，一般使用有关湍流边界层中混合长度的 Van Driest 假说的方法（Van Driest，1956）。

通过校正从流体到壁的壁剪切应力和热通量的半经验系数，对粗糙度影响（被视为相当沙粒粗糙度）和边界层上的外部流动湍流进行建模。在相应的经验和半经验模型中还应考虑流体压缩性、湍流动能耗散和各种体力。

从边界层计算中，SOLIDWORKS Flow Simulation 得出边界层厚度 δ、壁剪切应力 τ^e_w 和从流体到壁的热通量 q^e_w，这些被用作纳维-斯托克斯方程的边界条件：

$$\tau_w = \tau^e_w, \quad q_w = q^e_w, \tag{19}$$

k 和 ε 的边界条件通过近壁计算网格单元中的湍流平衡条件确定：

$$\frac{\partial k}{\partial y} = 0, \qquad \varepsilon = \frac{C_\mu^{0.75} k^{1.5}}{\kappa y}. \tag{20}$$

2. 厚边界层方法

当越过边界层的单元数量充足时（大于 ~10），通过纳维-斯托克斯方程完成层流边界层的仿真，作为中心流计算的一部分。对于湍流边界层，采用了一种众所周知的壁函数方法的修正。然而，不同于采用对数速度曲线的经典方法，SOLIDWORKS Flow Simulation 技术采用由 Van Driest (1956) 提出的全曲线：

$$u^+ = \int_0^{y^+} \frac{2 \cdot d\eta}{1 + \sqrt{1 + 4 \cdot \kappa^2 \cdot \eta^2 \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\eta}{A_v}\right)\right]^2}} \qquad (21)$$

式中：$\kappa = 0.4054$ 是 Karman 常数，$A_v = 26$ 是 Van Driest 系数。

所有其他假设与经典壁函数方法类似。

5. 数值方法和计算示例

流体区域从算法复杂性和计算开销方面提出了主要计算挑战。使用任意 CAD 作为几何信息的来源，必须特别注意所用的数值方法的可靠性和效率。

SOLIDWORKS Flow Simulation 使用 2 种不同类型的解算器和相关的数值算法来建立流体流动模型。第一个解算器适用于不可压缩的流和马赫数小于 3.0 的流。同时使用了连续性和对流/扩散方程的隐式时间近似值（用于动量、温度等）以及算子分裂技术（请参见 Glowinski 和 Tallec，1989、Marchuk，1982、Samarskii，1989、Patankar，1980）。该技术用于对压力速度去耦问题进行有效求解。根据一个简单方法 (Patankar, 1980)，通过原来得出的质量和动量离散方程进行代数变换得出椭圆型离散压力方程，同时考虑针对速度的边界条件。

为了对从动量、温度和物种方程的近似值中得出的线性方程式的非对称系统进行求解，使用了 Saad (1996) 的广义预处理共轭梯度方法。不完整的 LU 因子分解用于进行预处理。

为求解针对压力校正的对称代数问题，使用了原来的双预处理迭代过程。它基于 Hackbusch (1985) 专门开发的多网格法。

下例以第一类解算器的使用为基础。这是 F-16 战斗机周围的一个外部流（马赫数等于 0.6 和 0.85）。几何体是配备外部油箱和武器的飞机的原始 CAD 模型。考虑了引擎喷嘴进气和排气的流。

使用约 200000 个单元进行了计算，显示出 SOLIDWORKS Flow Simulation 技术的效率。计算结果与 Nguyen、Luat T 等 (1979) 的测试数据进行了对比。

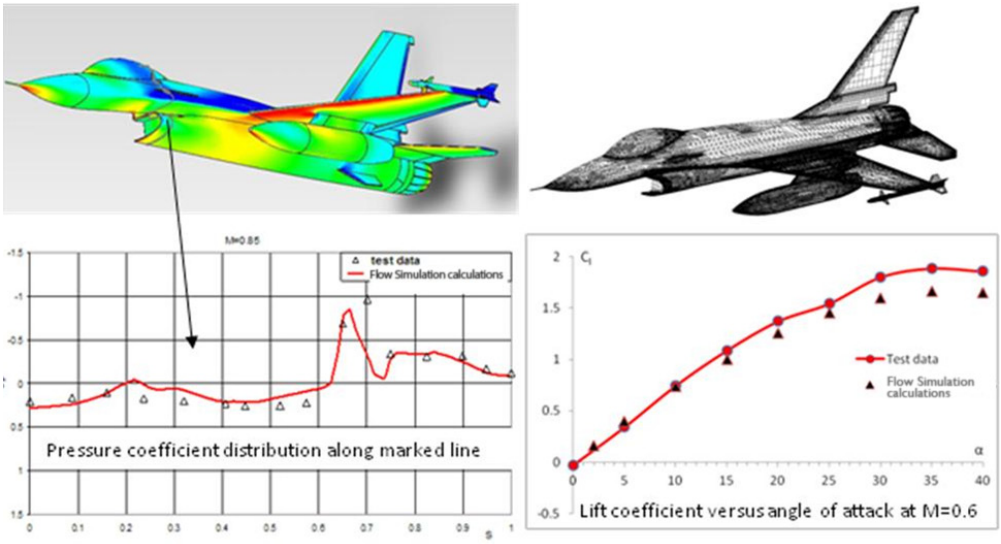


图 13：战斗机 F-16 计算。

该解算器通过 SOLIDWORKS Flow Simulation 广泛的可用物理模型扩展，如各种流体介质的重力、辐射、真实属性等。以下是说明这些能力的一些示例。

将 EFD 技术平台用作 CAD/CFD 桥接为复杂模型的专门单元中特定流的求解提供了额外优势，在该模型中，单元数不足以进行完整的 3D 建模。通过直接访问原始 CAD 数据，SOLIDWORKS Flow Simulation 技术平台可确认，一些几何体可形成类似管道或薄通道的流道，因为该信息存在于 CAD 系统中。在此情况下，使用分析或经验数据代替此流道内的 3D 纳维-斯托克斯方程模型。在图 14 中，为扰流柱散热器内的流动提出了该方法。

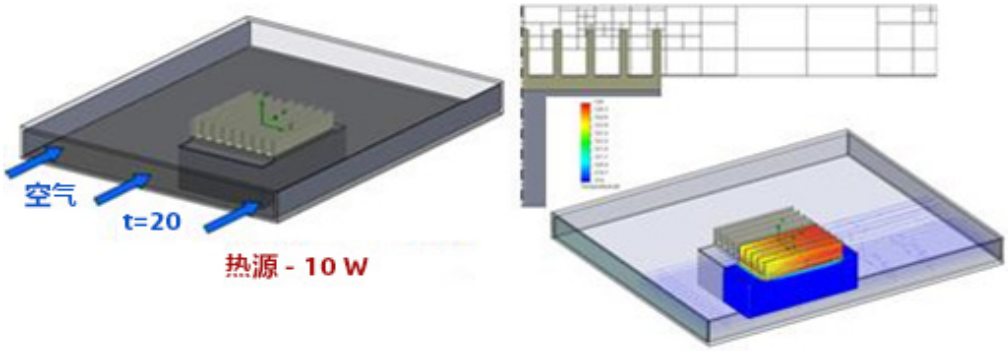


图 14：使用"薄通道"技术的 SOLIDWORKS Flow Simulation 计算。

在这里使用了上述薄通道技术，其中通过通道的单元数为 1-2。SOLIDWORKS Flow Simulation 的计算结果是一个非常粗糙的网格（总计 3900 个单元）和一个相对精细的网格（总计 180000 个单元），与 Jonsson 和 Palm (1998) 的实验数据的对比如表 1 所示。

流速	0.9 m/s		1.3 m/s		1.6 m/s		1.9 m/s	
R_{texp}，K/W	3.72		3.20		2.91		2.69	
单元数	3,900	180,000	3,900	180,000	3,900	180,000	3,900	180,000
R_{tcalc}，K/W	3.714	3.77	3.213	3.22	2.969	2.93	2.78	2.70
δ, %	0.2	1.3	0.4	0.6	2	0.7	3.3	0.3

表 1：使用"薄通道"方法（3,900 个单元）、完整 3D 方法（180,000 个单元）的 SOLIDWORKS Flow Simulation 计算结果以及与实验的区别。

对含有氟利昂 R22 作为工作流体的空调设备的计算显示出将相同的方法用于更复杂模型的优势（参见图 15）。

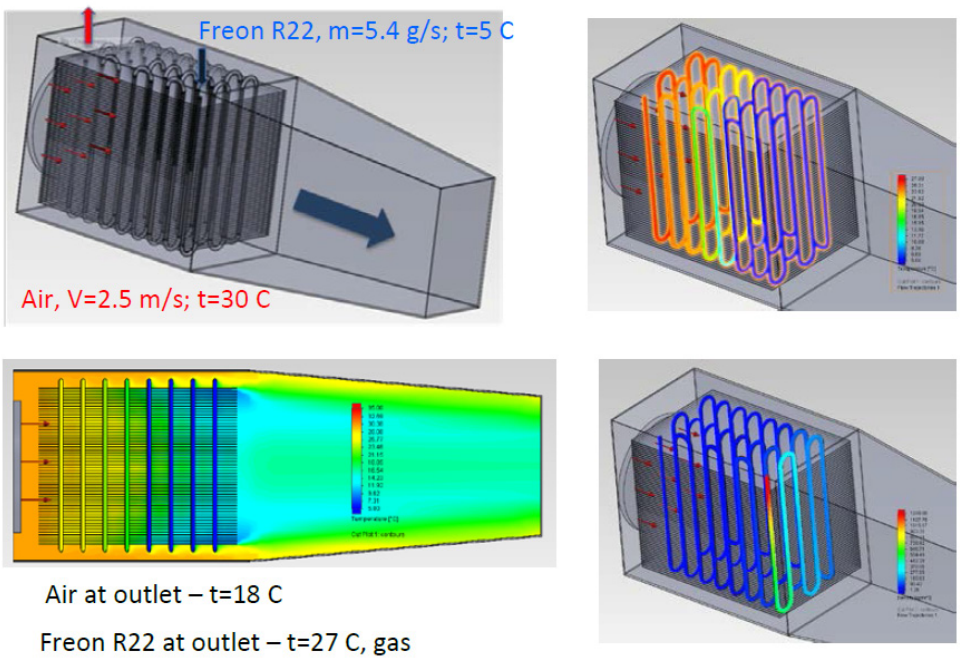


图 15：空调运行仿真

在此情况下，考虑了实体中的热交换和氟利昂中的相交换过程。

SOLIDWORKS Flow Simulation 中第二个最近提出的解算器用于计算带气穴的液体中的流动，使用对 CFD 而言较新的一种数值方法（请参见 Alexandikova 等，2011）。气穴现象提出了大量有关密度、声速和时标变化的数值难题。声速可从液体流中的每秒几千米下降到汽化流中的十或更少。这会导致具有高马赫数的超音速流动，有时具有冲击。气穴问题因此具有在单计算域中从接近零到几十的宽范围马赫数特征。因此，当构建数值方法对气穴流动进行仿真时，重要的是考虑不可压缩流和高度压缩流区域共存于计算域中。

迄今为止有两个主要的计算此类全速可压缩流的方法。第一种采用原来开发的"基于密度"的方法，对速度可压缩流进行仿真。通过引入人工可压缩性或使用一些预处理技术，这些方法适用于低马赫数情况（Kunz 等，2000、Lee 等，2006，2007）。

第二种方法利用原来为不可压缩流开发的"基于压力"的方法。通常，这些是差分格式的简单系列（或"压力校正"方法）并适用于涉及高速可压缩流的情况（van der Heul 等，2000）。

SOLIDWORKS Flow Simulation 的方法不同于以上两种。乍看起来，在不可压缩流区域中使用"基于压力"方法与在超音速可压缩流区域中采用"基于密度"方法的想法看似非常自然。但如何结合这些方法却不明显。我们根据以下的简单核心思想提出了一种结合这两种方式的办法。通过采用有限体积方法，我们建议将控制体表面上对应于"基于压力"和"基于密度"方法的通量与压力近似值相混合。然后，在一种简单型差分格式中这些混合的近似值被替换。通过管理通量和压力近似值之间的混合权重，我们可以获得原始的简单型半隐式分裂格式或显式"基于密度"的格式或这些方法的混合。

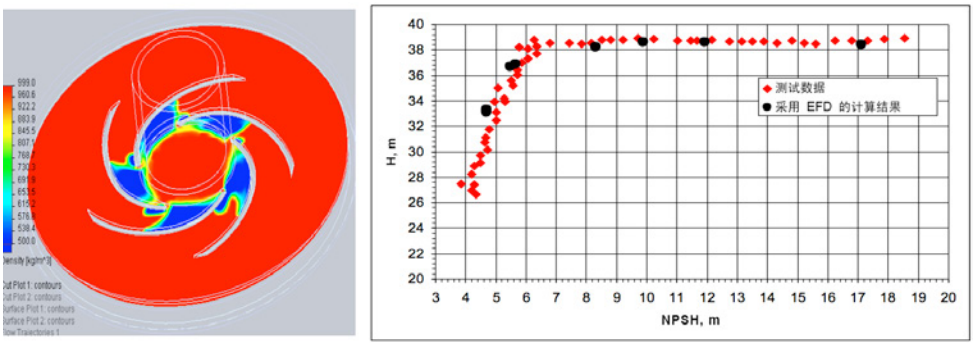


图 16. 离心泵中的气穴计算。

图 16 显示了离心泵中的流动示例，具有通过使用此混合解算器获取的气穴。将 SOLIDWORKS Flow Simulation 计算结果与 Hofman 等 (2001) 的实验数据进行了对比。

6. 结论

全球 CAE 市场的趋势明确显示出，最新设计问题求解中 CFD 计算的市场份额呈稳步增长。在该市场内，SOLIDWORKS Flow Simulation 是适应最新 CAE 技术（即：流体力学和热传递）的创新示例，可满足设计工程师的日常需求。

EFD（工程流体力学）由以下技术组成：管理 CAD 数据、笛卡尔网格生成器、一组 CFD 解算器、工程建模技术以及结果处理。此平台成为连接 CAD 和 CFD 的完整桥梁。

EFD 技术是基于下列关键原则：

- 基于笛卡尔的网格化技术，直接处理任意复杂的原始 CAD 几何体；
- 边界层处理技术，允许在相对粗糙的笛卡尔网格上进行流体流动计算。该技术依据完全可扩展的壁函数方法来定义实体壁的表面摩擦和热流动；
- 工程模型，在计算网格对于完整 3D 建模来说不够精细时使用。

本文阐述了在 SOLIDWORKS Flow Simulation 中采用的 CFD 解算器的计算示例：用于不可压缩和低压缩流的隐式解算器和用于带有空穴的液体流的混合解算器，从而展示了 EFD 技术的高仿真效率和高精度。针对较粗糙网格的良好性能、CAD 嵌入式功能以及针对模型设置、网格化和求解的高度自动化和可用性的结合，使 SOLIDWORKS Flow Simulation 成为支持工程设计的有效 CFD 分析工具。

参考文献

Alexandrikova T., Pavlov A., Streltsov V. (2011) Hybrid density- and pressure-based splitting scheme for cavitating flows simulation, ***Computational Methods in Multiphase Flow VI***, Editors: A.A. Mammoli, C.A. Brebbia, WIT Transactions on Engineering Sciences, Vol. 70, pp. 41-56, WIT Press, 2011, ISBN: 978-1-84564-518-2.

Baker, T.J. (1989) Automatic Mesh Generation for Complex Three-Dimensional Regions Using a Constrained Delaunay Triangulation, ***Engineering with Computers***, Vol. 5, pp.161-175.

Balakin, V., Churbanov, A., Gavriliouk, V., Makarov, M. and Pavlov A. (2004) Verification and Validation of EFD.Lab Code for Predicting Heat and Fluid Flow, ***Proceedings of ICHMT International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer, Norway***, April 19-24, 2004.

Delaunay, B.N. (1934) Sur la Sphere Vide. ***Izvestia Akademia Nauk SSSR, VII Seria, Otdelenie Matematicheskii I Estestvennyka Nauk***, Vol. 7 pp.793-800.

Filipiak, M. (1996) ***Mesh Generation***, Edinburgh Parallel Computing Centre, The University of Edinburgh, Version 1.0, November 1996.

Ginzburg, I.P. (1970) ***Theory of Drag and Heat Transfer***. Leningrad, LGU (in Russian).

Gaitonde D., Shang J.S. (1993) Accuracy of flux – split algorithms in high – speed viscous flows, ***AIAA Journal***, Vol.31 No. 7 pp. 1215-1221.

Gavriliouk, V.N. Denisov, O.P. Nakonechny, V.P. Odintsov, E.V. Sergienko, A.A. Sobachkin, A.A. (1993) Numerical Simulation of Working Processes in Rocket Engine Combustion Chamber, ***44th Congress of the international Astronautical Federation***, IAFF-93-S.2.463, October 16-22, Graz, Austria.

Glowinski, R. and P. Le Tallec (1989) ***Augmented Lagrangian Methods and Operator-Splitting Methods in Nonlinear Mechanics***. SIAM, Philadelphia.

Hackbusch, W. (1985) ***Multi-grid Methods and Applications***, Springer-Verlag, NY, USA.

Hofman M., Stoffel D., Coutier-Delgosha O., Fortes-Platella R., Reboud Jl. (2001) ***Experimental and numerical studies on a centrifugal pump with 2D-curved blades in cavitation condition***, CAV2001:session B7.005.

Jonsson, H. and B. Palm, (1998) Thermal and Hydraulic Behavior of Plate Fin and Strip Fin Heat Sinks under Varying Bypass Conditions, ***Proc. 1998 InterSociety Conf. on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITHERM ´98)***, IEEE, pp. 96-103, ISBN 0.7803-4475-8.

Kunz R., Boger D., Stinebring D., Thomas S. Chyczewski, Lindau J., Gibeling H., Venkateswaran S., Govindan T. (2000) A preconditioned Navier-Stokes method for two-phase flows with application to cavitation prediction, ***Computers & Fluids***, Volume 29, Issue 8, 31 August 2000, Pages 849-875.

Lam, C.K.G. and Bremhorst, K.A. (1981) Modified Form of Model for Predicting Wall Turbulence, ***ASME Journal of Fluids Engineering***, Vol.103, pp. 456-460.

Lawson, C.L. (1977) Software for C1 Surface Interpolation, ***Mathematical Software III***, pp.161-194.

Li Ding, Charles L. Merkle (2006) A unified framework for incompressible and compressible fluid flows, ***Journal of Hydrodynamics***, Ser. B, Volume 18, Issue 3, Supplement 1, Proceedings of the Conference of Global Chinese Scholars on Hydrodynamics, July 2006, Pages 113-119

Li Ding, Xia Guoping, Merkle Charles L. (2007) Consistent properties reconstruction on adaptive Cartesian meshes for complex fluids computations, ***Journal of Computational Physics***, Volume 225, Issue 1, 1 July 2007, Pages 1175-1197

Lohner, R. Cebral, J. Castro, M. Baum, J.D. Luo, H. Mestreau, E. and Soto, O. (2004) Adaptive Embedded Unstructured Grid Methods, ***Mecanica Computacional***, Vol. XXIII, pp. 29-42, G.Buscaglia, E.Dari, O.Zamonsky (Eds.), Bariloche, Argentina, November.

Marchuk, G.I. (1982) ***Methods of Numerical Mathematics***, Springer-Verlag, Berlin.

Mentor Graphics (2011a) Advanced Immersed Boundary Cartesian Meshing Technology in FloEFDTM, MGC 02-11, TECH9690-w, Mentor Graphics Corporation, 2011.

Mentor Graphics (2011b) Enhanced Turbulence Modeling in FloEFDTM, MGC 02-11, TECH9670-w, Mentor Graphics Corporation, 2011.

Nguyen, Luat T. et al. (1979) Simulator Study of Stall/Post – Stall Characteristics of a Fighter Airplane with Relaxed Longitudinal State Stability, ***NASA Technical Paper 1538***, Dec. 1979.

Parry, J. and Tatchell, D. (2008) Flomerics' EFD Meshing Technology: A White Paper, Flomerics Ltd.

Patankar, S.V. (1980) ***Numerical Heat Transfer and Fluid Flow***, Hemisphere, Washington, D.C.

Saad, Y. (1996) ***Iterative methods for sparse linear systems***, PWS Publishing Company, Boston.

Samarskii, A.A. (1989) ***Theory of Difference Schemes***, Nauka, Moscow (in Russian).

Sayre A,N. Lallemant, J. Dugue, R. Weber (1994) Scaling Characteristics of Aerodynamics and Low-NOx Properties of Industrial Natural Gas Burners, ***The SCALING 400 Study, Part IV: The 300 kW BERL Test Results***, IFRF Doc No F40/y/11, International Flame Research Foundation, The Netherlands.

Watson, D.F. (1981) Computing the Delaunay Tesselation with Application to Voronoi Polytopes. ***The Computer Journal***, Vol. 24(2) pp. 167-172.

Van der Heul D.R., Vuik C., Wesseling P. (2002) A conservative pressure-correction method for flow at all speeds. J.M. Burgers Center, Department of Applied Mathematical Analysis, Faculty of Information Technology and System, Delft University of Technology, Mekelweg 4, 2628 CD Delft, The Netherlands, 2002.

Van der Heul Duncan R., Vuik C. and Wesseling P. (2000), Efficient computation of flow with cavitation by compressible pressure, European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, ECCOMAS 2000.

Van Driest, E.R. (1956) On Turbulent Flow Near a Wall, ***Journal of the Aeronautical Science***, Vol. 23, No. 10, pp. 1007.

Weatherill N.P. and Hassan O. (1994) Efficient Three-dimensional Delaunay Triangulation with Automatic Point, ***International Journal for Numerical Methods in Engineering***, Volume 37, Issue 12, pp 2005–2039, 30 June 1994.

我们的 3DEXPERIENCE® 平台为我们服务于 12 个行业领域的品牌应用程序提供了技术驱动，同时提供了一系列丰富的行业解决方案经验。

3DEXPERIENCE 公司 Dassault Systèmes 为企业和用户提供可持续构想创新产品的虚拟空间。本公司全球领先的解决方案转变了产品的设计、生产和支持方式。Dassault Systèmes 协作解决方案促进社会创新，从而提高虚拟世界改善现实世界的可能性。本集团为来自 140 多个国家/地区、各行各业、不同规模的 170,000 多位客户带来价值。有关更多信息，请访问 **www.3ds.com/zh**。

3DEXPERIENCE

DASSAULT SYSTEMES | The **3D**EXPERIENCE Company

美洲
Dassault Systèmes
175 Wyman Street
Waltham, Massachusetts
02451-1223
美国

亚太地区
Dassault Systèmes
ThinkPark Tower
2-1-1 Osaki, Shinagawa-ku
东京 141-6020
日本

大中国区
+86 400-818-0016
infochina@solidworks.com

©2014 Dassault Systèmes。保留所有权利。**3D**EXPERIENCE, CATIA, SOLIDWORKS, SIMULIA, DELMIA, ENOVIA, GEOVIA, EXALEAD, NETVIBES, 3DSWYM 和 3D VIA 是 Dassault Systèmes 或其子公司在美国和/或其他国家/地区的注册商标。其他品牌和产品名称均为各自所有者的商标。KTNUMWPCHS0214