

STAR-CD 系列软件介绍

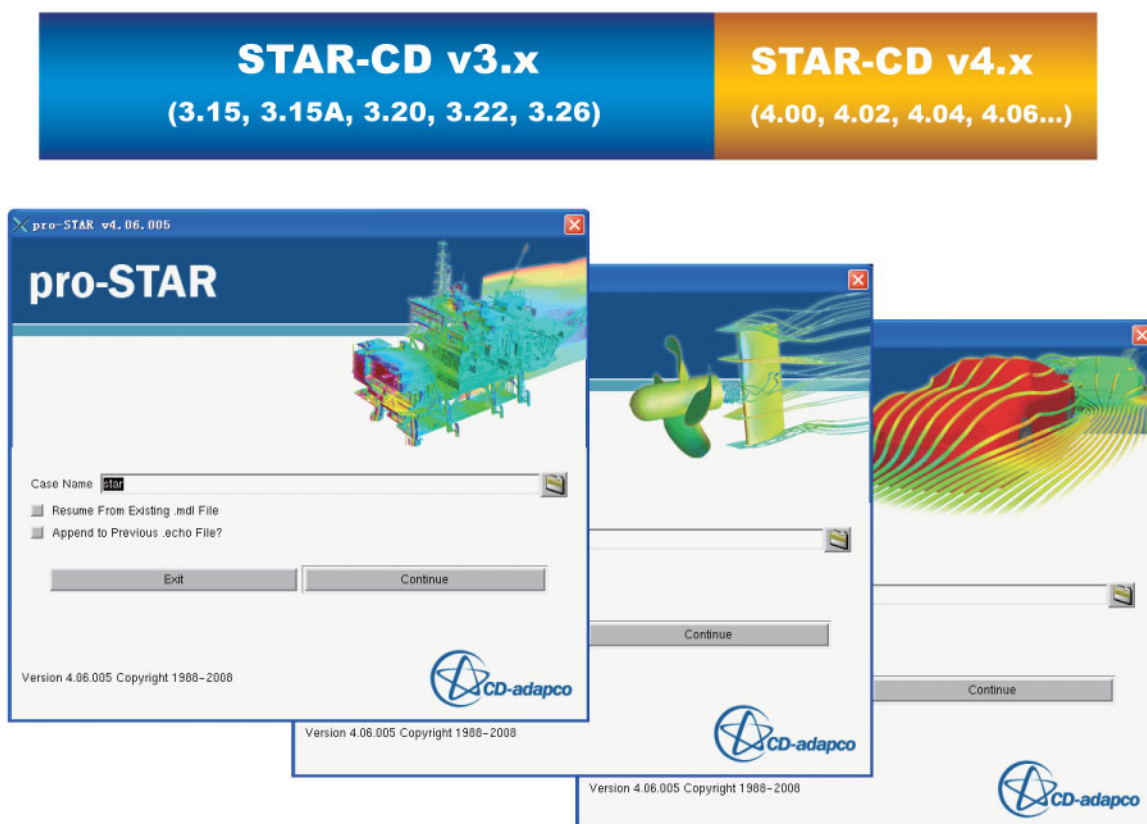
概述

STAR-CD最初是由流体力学鼻祖-英国帝国理工大学计算流体力学领域的专家Gosman教授带头开发的，他们根据传统传热基础理论，合作开发了基于有限体积算法的非结构化网格计算程序。在完全不连续网格、滑移网格和网格修复等关键技术，STAR-CD又经过来自全球10多个国家，超过200名知名学者的不断补充与完善，成为同类软件中网格适应性、计算稳定性和收敛性最好的佼佼者。20多年以来，STAR-CD一直是计算流体力学模拟的通用平台并获得了良好的声誉。如今，STAR-CD本身已经不仅仅是计算流体力学软件，最新发布的版本STAR-CD V4基于其领先的计算流体力学求解器引入了结构分析计算的求解能力，一个流动、传热和应力模拟一体化的通用软件首次呈现在您的面前。

- 先进的数值算法—连续介质算法 (CCM)
 - 连续介质力学 (CCM) 求解器 (应力分析, 电流分析, 铸造分析)
 - 物理模型 (多相流, 湍流模型)
 - 加入了新的移动网格 (重叠网格, 6自由度移动)
- 提升了求解器性能，来支持新的物理模型和新的网格类型
 - 改进的自由表面 (VOF) 算法
 - 拓展了化学反应和燃烧模型
 - 连续介质力学 (CCM) 求解器 (应力分析, 电一流场分析, 等等)
 - 支持超过 1 亿网格的计算

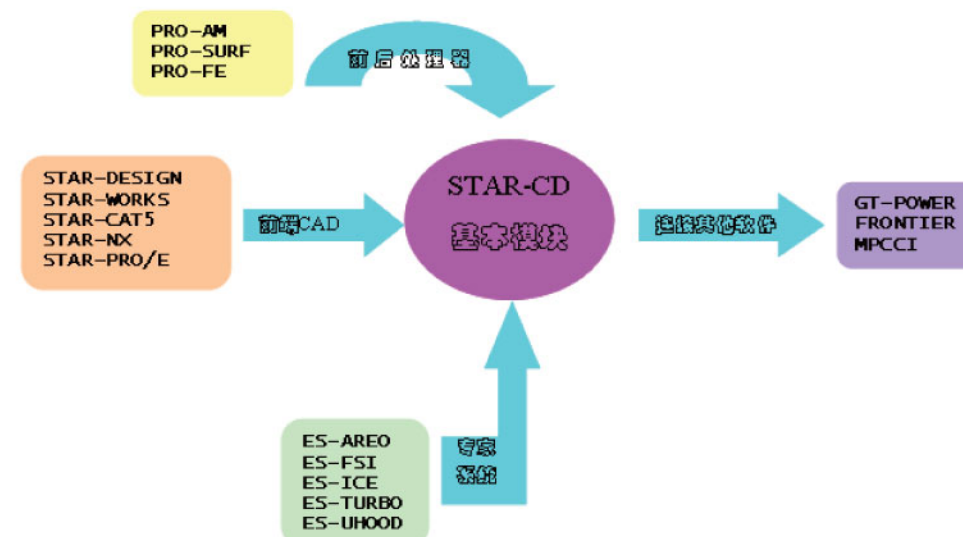
运行平台

STAR-CD的所有相关产品均可以在WINDOWS NT/2000/XP, VISTA, LINUX, UNIX上运行。



STAR-CD V4 特点:

- 更新的网格生成工具 (AutoMesh模块)
 - 新的包面功能 (surface wrapper): 可以将工程案例中的复杂CAD模型转化为封闭的面网格。
 - 新的面网格重构和体网格生成器 (从 v4.02以后): 全自动生成, 无需人工中途干涉。



网格生成工具

- PRO-AM: 通用四面体/trimmed/混合网格/多面体网格自动生成工具。
- PRO-SURF: 面网格生成/修补工具。

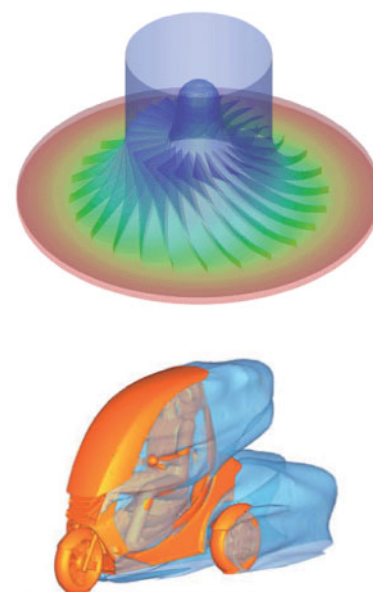
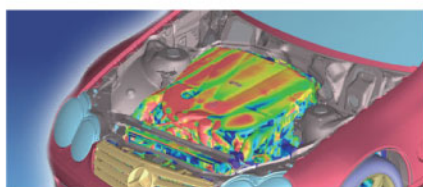
前端CAD功能

- STAR-DESIGN: 全新内置全功能几何造型工具。
- STAR- (WORKS, CAT5, NX, PRO/E): 集成SOLIDWORKS, CATIA5, UG, PRO/E几何造型工具。

专家工具系列

专家系统系列软件包是CD-adapco针对不同应用领域所开发的专业分析工具。专家工具均拥有完整的前后处理、网格生成及求解功能。

- ES-UHOOD：发动机舱内热管理专家系统工具。
- ES-ICE：内燃机分析专家系统工具。
- ES-AREO：空气动力学专家系统工具。
- ES-FSI：流固耦合分析专家系统工具。
- ES-TURBO：旋转机械专家系统工具。
- ICEM-CFD：流体网格工具。



联合求解软件

- GT-SUITE[1]：该产品主要用于内燃机动、静态性能及噪声分，配气相位优化，冷却系统分析，供油系统分析，曲轴震动分析，发动机/车辆一体化动力性、经济性分析等多种典型的内燃机特性分析。可与STAR-CD进行耦合计算，也可与控制分析软件Simulink连接进行特性-控制性分析。包括GT-POWER、GT-VTRAIN、GT-COOL、GT-FUEL、GT-CRANK以及GT-DRIVE等模块。
- modeFRONTIER[2]：多目标、多变量、多约束优化分析工具。
- MPCCI[3]：STAR-CD与MPCCI联合使用可为用户提供多物理场耦合问题的解决方案。

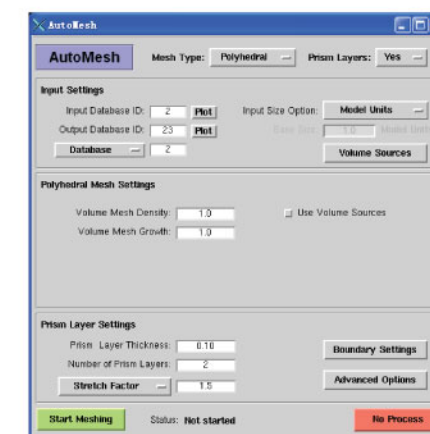
STAR-CD功能介绍

PRO-AM：自动非结构化网格生成工具

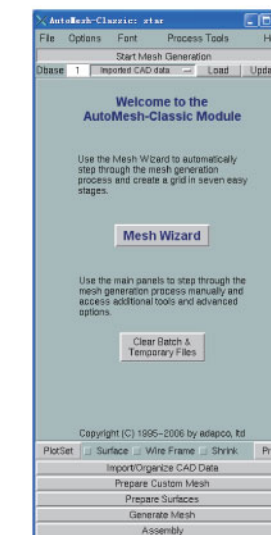
PRO-AM作为STAR-CD的专门的网格前处理工具，始终坚持网格自动生成这一概念，尽量减少人工干预，并使其网格适用于离散各种复杂的几何。PRO-AM使用户具有空前的网格控制能力：

- ◆ 多面体网格生成功能
- ◆ 高质量的内部六面体网格功能
- ◆ 四面体网格生成功能
- ◆ 混合网格生成功能

- ◆ 分层的贴壁棱柱体网格
- ◆ 自动局部加密技术和用户自定义模板功能
- ◆ 更新的基于原始表面的包面和表面网格重造工具



Auto Mesh 模块面板



Auto Mesh Classic 模块面板

多面体网格(Polyhedral mesh)介绍

多面体网格具有良好的适应性，适合于离散各种复杂的三维几何模型。多面体网格通常由10到12个表面围成，每个表面呈多边形。多边形网格适合于求解复杂的流动情况，因为一个多面体单元具有因为有多面，会用更大的机会获得网格和流场的正交化。

六面体为主的网格 (Trim mesh) 介绍

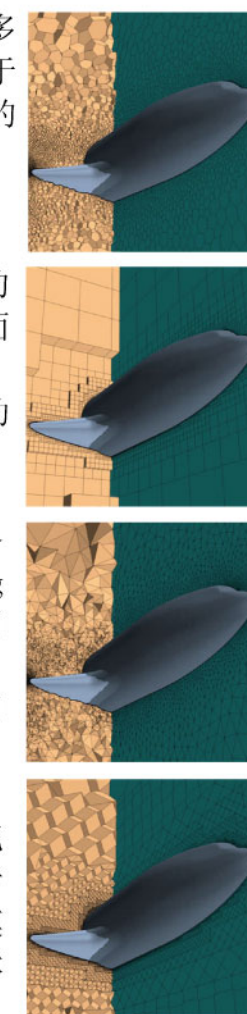
它使用“单元修整技术”生成高质量的六面体为主的网格 (Trimed Mesh)，形成以内部六面体网格为主，其他类型的多面体为辅，近壁采用分层结构的总体网格拓扑结构。这有助于准确使用通用高雷诺数k-ε湍流模型的标准壁面函数和需要精细边界网格的湍流两层模型。正是因为高效的网格结构，PRO-AM生成的单元数目接近于传统的完全六面体网格。这表明强大的自动网格生成功能并没有以牺牲计算速度为代价。

四面体网格(Tetrahedral) 和混合网格(Hybrid)介绍

PRO-AM提供全四面体网格和混合网格的生成技术。应用全四面体网格生成工具，用户可根据需求选择Delaunay方法和前沿推进方法 (Advancing Front) 产生高质量的网格，并且可产生包含内部挡流板 (baffle) 的全域网格。应用混合网格生成工具，用户可产生包括四面体，六面体，金字塔体，和三棱柱体在内的全域网格。其基本思想是：内部采用六面体网格，外层采用四面体网格，过渡区采用金字塔体和三棱柱体网格。

自动局部加密和自动模板介绍(refinement)

PRO-AM可以根据几何细度要求对某些区域进行自动加密。此外，把PRO-AM的加密特点与STAR-CD任意交界面技术相结合，就可以对网格进行手工局部加密，而不用涉及其他部分的网格。两者结合起来可形成强大的模板功能。依据特定模板，某一几何形体可进行定制处理，由此可大大提高体积网格的生成效率。



网格表面处理与修复功能(surface repair and wrapper)

PRO-AM给用户提供了修改、封闭和优化表面的超强处理工具。PRO-AM提供全套表面基本工具例如：填洞，连接边沿，和单元手工修补工具。为加快表面封闭的速度，PRO-AM提供表面封包工具（Surface Wrapper），可应用于大型复杂表面的封包。为提高表面的质量，PRO-AM提供了制作新表面的工具（New Surface Tool）和重造表面工具（Resurface），尤其是后者，可大大提高表面的质量和生成速度，并进一步提高六面体为主的网格生成质量。另外，表面光滑处理和细化可自动完成。

PRO-STAR：前后处理工具

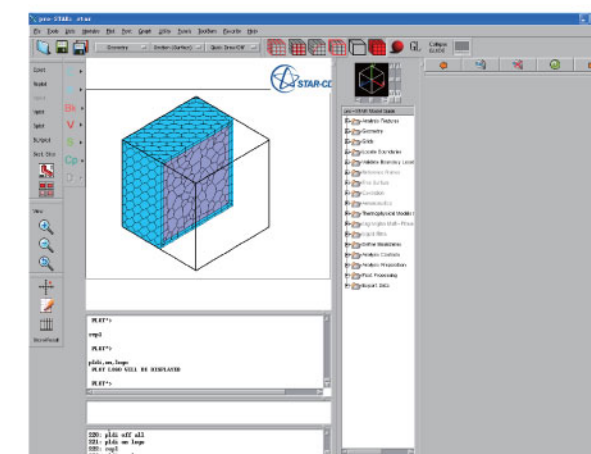
STAR-CD使用的前后处理软件包称为PRO-STAR。PRO-STAR集成了建模、求解与后处理所必需的各种工具。其面向过程的、易用的GUI和计算导航器使即使新手也能够方便得掌握解析复杂问题的设定，计算和后处理。

PRO-STAR主要完成以下功能：

- ◆ 网格生成/修整。
- ◆ 设定边界条件。
- ◆ 设定工质物性。
- ◆ 设定计算内容（多相流，化学反应）。
- ◆ 设定控制参数（格式，时间，输入输出参数）。
- ◆ 计算过程监控。
- ◆ 计算结果后处理。

PRO-STAR具有如下特点：

- ◆ 包括所有解算步骤的计算导航器。
- ◆ 菜单驱动与命令驱动的双重输入方法。
- ◆ 可以选择常规或专家模式，同时有在线错误跟踪、警告及帮助功能。
- ◆ 用户自定义面板能使用户优化后处理及定制自己喜欢的PRO-STAR的外观
- ◆ 手动加密和随问题复杂性不同的自动化网格加密。
- ◆ 提供对如下专用CAE软件的接口：ICEM CFD、GRID3D、MSC/NASTRAN、ANSYS、I-DEAS。
- ◆ 提供与其他一些后处理系统ICEM VISUAL 3、ENSIGHT、FIELDVIEW接口。
- ◆ 适于CFD需要的快速有效的网格与结果的显示技术，硬件相关的三维图形相容加速性。
- ◆ 众多的图形显示方法包括矢量、等值线、等值面、X-Y图形、静态粒子轨迹、外部计算结果数据导入导出及表面渲染等。
- ◆ 任意横截面的结果显示及任意网格与表面上结果的图形表示。
- ◆ 描述动态结果的动画控制。
- ◆ 计算中随时调控收敛情况的驾驭功能。
- ◆ 适用于大容量网格的，最大限度利用内存的计算机动态内存技术。
- ◆ 增强的表输入功能，清晰明了的文件系统。



PRO-STAR 的界面

网格能力

STAR-CD可以生成和使用任意可以想象形状的贴体网格，如六面体、四面体、棱柱体、金字塔形甚至多面体网格。网格单元与任意的界面技术和局部加密技术相结合可以产生非连续的、完全非结构化网格。

利用自动网格生成器例如：PRO-AM，即可快速生成完全非结构化网格。这意味着使用STAR-CD没有任何几何限制。无论多么复杂的几何形状，用户都可以在最短的时间内灵活生成最佳的网格，并用它获得可靠而又精确的结果。

STAR-CD不仅具有GUI的、面向多块网格的生成工具与强大的非结构化六面体网格生成能力，也可以方便的导入其他第三方软件的网格文件（NAS，UNV，STL等）。

STAR-CD的全方位的网格处理能力包括：

- ◆ 由六面体、四面体、多棱柱、多面体及其任意组合构成的适用于任意几何的、高度灵活的非结构化网格技术。
- ◆ 新加入单元面任意破分技术，使得不连续的网格可以任意连接。
- ◆ 网格加密用来增强局部的网格分辨率和适应性误差控制；自适应性加密使得用户对于任何网格拓扑进行基于物理参数的适应性局部加密。
- ◆ 运动网格技术（包括网格的动态分离与/连接，增加/删除，平移/旋转，拉伸/压缩）解决内燃机活塞/气门运动，旋转机械，变容积计算，车辆交汇等动边界问题。对于复杂非预设的网格运动，STAR-CD也具有强大的处理能力，可以用来求解武器发射，物体分离等物理问题。

边界的设定：

- ◆ 进口边界（INLET Boundary）
- ◆ 出口边界（OUTLET Boundary）
- ◆ 压力边界（PRESSURE Boundary）
- ◆ 驻点边界（STAGNATION Boundary）
- ◆ 周期性边界（CYCLIC Boundary）
- ◆ 对称边界（SYMMETRY Boundary）
- ◆ 自由流无反射边界（FREE-STREAM TRANSMISSIVE Boundary）
- ◆ 动态波动无反射边界（TRANSIENT-WAVE TRANSMISSIVE Boundary）

- ◆ 动态附着边界 (ATTACHMENT Boundary)
- ◆ 壁面边界 (WALL Boundary)
- ◆ 隔板边界 (BAFFLE Boundary)
- ◆ 监控面边界 (MONITORING Boundary)
- ◆ 辐射边界 (RADIATION Boundary)
- ◆ 气体逃逸边界 (PHASE-ESCAPE (DEGASSING) Boundary)
- ◆ RIEMANN边界 (RIEMANN Boundary)
- ◆ 无反射压力边界 (NON-REFLECTIVE PRESSURE Boundary)
- ◆ 无反射驻点边界 (NON-REFLECTIVE STAGNATION Boundary)

求解能力:

与同类CFD软件相比, STAR-CD是一个单一的高度集成化的软件包。它将在各种网格类型(六面体、四面体与混合体及多面体)上解算的各种物理模型融于一体。同时对不同类型的应用提供经过优化的解算过程。

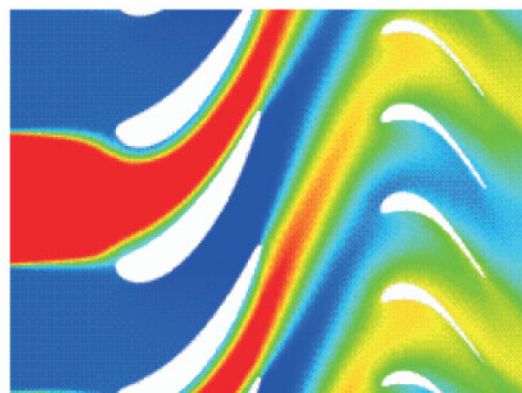
STAR-CD包含了不断更新与扩展的各种最新物理模型, 非凡的灵活性及众多的用户程序接口。它的求解能力如下:

- ◆ 定常与非定常流动
- ◆ 层流与湍流 (最新的湍流模型)
- ◆ 牛顿流体与非牛顿流体
- ◆ 不可压流与可压缩流 (包括跨音速与超音速)
- ◆ 对流、传导与辐射传热 (包括固体内导热、太阳辐射、透明固体辐射及可穿透介质中辐射的传播)
- ◆ 传质
- ◆ 化学反应 (包括气体、液体与固体燃料燃烧)
- ◆ 分布式阻力 (多孔介质与热交换器)
- ◆ 多股流体流动
- ◆ 欧拉及拉格朗日多相流 (稀密相气固、气液、固液、液液系统)
- ◆ 自由表面流动、气穴模型
- ◆ 熔化、凝固
- ◆ 应力分析
- ◆ 多学科耦合 (流固耦合问题, 流体与电磁场耦合问题)
- ◆ 液膜模型
- ◆ 声源预测模型

物理模型的特点

MRF (多重旋转参照体系)

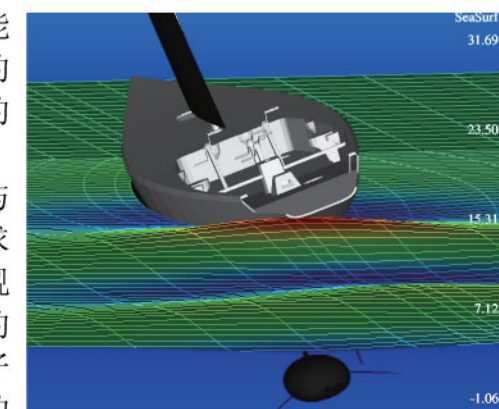
STAR-CD中MRF技术能快速求解定常状态的旋转机械问题。例如: 风扇、泵与多级轴流式压气机。无论静叶与动叶的数目是否相同, 都可以通过使用周期性流动边界条件把模型简化成单个动静叶通道, 从而大大缩短计算时间。



自由表面流动 (Free Surface)

STAR-CD先进的自由表面流动解算器和表面张力模型能够求解结构化与非结构化网格的自由表面问题。采用有效的子迭代时间步格式, 可以快速进行复杂的全三维应用项目的求解。

相间界面的拓扑结构可以是未知的。例如船舶设计中波与船身的相互作用, 气液交界面的形状可以作为解的一部分求解出来。此外, 提供了两种空化模型用来求解流动的空化现象, 并采用了高阶的差分格式, 提高空化中气液两相界面的分辨率。同时, 在给定时间步长基础上, 求解器能够进行子迭代, 意味着用户可以使用较大的时间步长得到同样精确的结果。



可压缩流 (Compressible Flow)

由于采用高分辨率的TVD类型的差分格式 (MARS), STAR-CD比传统的高阶离散格式的计算精度和稳定性有了很大提高。计算表明MARS捕获尖锐突跃的同时只有很少的耗散误差。

湍流模型 (Turbulence Models)

STAR-CD提供方程模型、标准K-E模型、RNG模型、高阶非线性及Chen氏系列 $k-\epsilon$ 模型、 $k-l$ 、LES大涡模型以及最新的V2F等湍流模式, 同时提供了用于解算高精度流动的和微分雷诺应力模型 (RSM)。用户还可以定制或添加自己的湍流模型。

传热 (Heat Transfer)

STAR-CD的特点在于能够同时求解多重固体材料的导热以及热辐射, 甚至可以求解透明固体的热辐射。任意交界面技术则被用来匹配流体与固体表面的接合, 使用户能够很容易地把流体与固体的网格结合起来。

多股流体流动 (Multiple Fluid Streams)

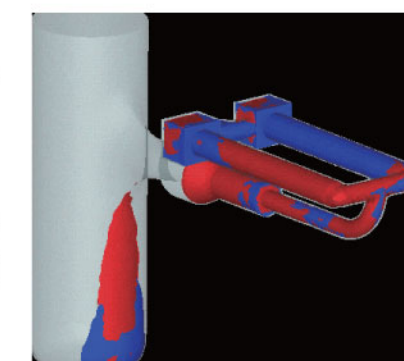
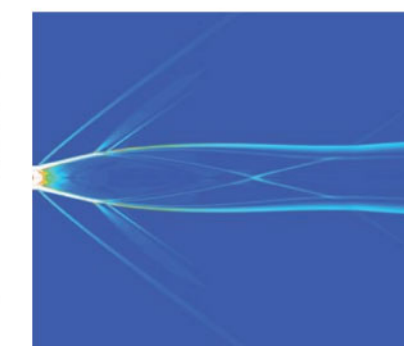
STAR-CD可以同时处理多种流体的流动。通常在换热器计算中就需要模拟两种流体的流动。

多孔介质 (Porous Media)

STAR-CD计算各向同性或异性的多孔介质。多孔介质的特性还可当地输入流场参数的函数来输入。

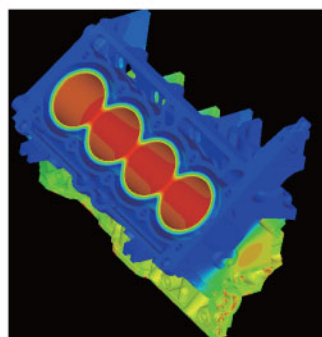
熔化/凝固模型 (Melting/Solidification Model)

STAR-CD可以实现熔化/凝固相变过程数值模拟。其中包括浇铸过程模拟、伴随自然对流的材料凝固或熔化、大孔介质预测、熔化和凝固过程中的耦合传热等。



应力分析 (Stress Analysis)

STAR-CD的应力分析采用隐式耦合方法，提高了计算效率和流固耦合计算的强健性。比较FEM显著降低了内存需求，使得工程师可以利用有限计算资源完成更大规模的结构分析问题，同时支持并行计算。STAR-CD的高质量、完全自动生成的多面体网格则可以进一步缩短应力分析问题的计算周期。目前支持线性应力分析即适用于线性材料和小变形问题。



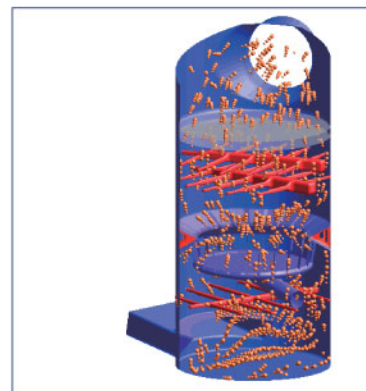
车辆热管理模型 (Vehicle Thermal Management)

STAR-CD车辆热管理系统包括发动机舱热管理分析、散热器、冷凝器分析、空调系统热舒适性分析、除霜/除雾分析等。

多相流 (Multiphase Flow)

多相流是包含汽、液、固体混合物的高度复杂的过程。STAR-CD提供了如下的多相流解算能力：

- ◆ 稀疏与连续多相流
- ◆ 固体粒子与液滴
- ◆ 定常与瞬态
- ◆ 液膜模型
- ◆ 液滴蒸发
- ◆ 众多喷射雾化模型
- ◆ 不同的液滴畸变模型（拉伸、破裂、合并与壁面结合）

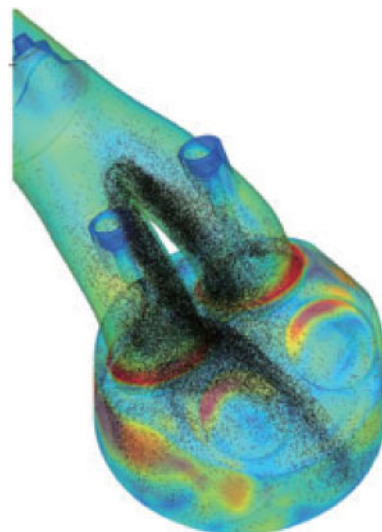


化学反应与燃烧

STAR-CD提供了如下的燃烧速率模型：

- ◆ 阿氏速率的有限速率化学反应
- ◆ 用Magnussen涡破裂模型考虑混合控制燃烧
- ◆ 混合控制与有限速率模型的结合
- ◆ 考虑时间尺度的混合控制模型
- ◆ PPDF模型与“即混即燃”平衡火焰、层流火焰选项
- ◆ 柴油机点火与燃烧模型
- ◆ 着火区域模型
- ◆ 辛烷冲击模型
- ◆ NOx预测
- ◆ 平衡解算器
- ◆ N步化学反应
- ◆ 煤燃烧、煤气化（脱去挥发成份、木炭燃烧、挥发燃烧）

另外非标准化学反应速率表达式、点火预测与混合控制燃烧模型可以使用用户的子程序来进行。



STAR：核心解算器

STAR-CD使用单一、高效、强壮（Robust）的解算器STAR求解流动。这个通用解算器适用于所有的流动情况与物理现象。解算器与最新的时间空间离散格式相结合，使STAR-CD在最复杂的CFD应用方面具有无可匹敌的能力。

内存效率 (Memory Efficiency)

STAR对内存使用有极高的效率。因为它对平均每100,000个计算元素只需要40M内存。这使用户可以使用最少的计算资源来解算较大的模型，可以很容易地在1G内存的单处理器的机器上求解多达200万个单元的复杂流动。

时间离散 (Temporal Discretization)

STAR-CD采用全隐式时间步方法，同时还提供二阶精度的时间离散格式来求解高精度动态计算问题。

空间离散 (Spatial Discretization)

STAR-CD给用户提供了从高阶到混合离散格式的多种选择。最近在众多选择中又加入了一种新的TVD格式 (MARS)。MARS不仅提高了剧烈梯度变化时的计算精度，还减少了对网格的依赖性。

隐式代数多重网格解算器 (AMG)

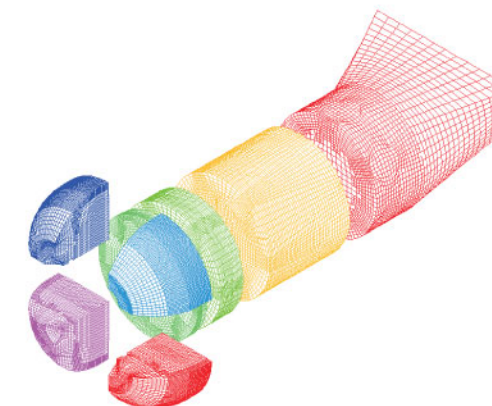
最新的针对非结构化网格的多重网格算法，比早期的解算器更快、更稳定。

强健性 (Robustness)

STAR-CD的强壮性使其可以处理最复杂几何中的所包括的重要物理现象。它不仅可以处理及其困难的大尺度几何模型，还可处理诸如辐射、多流体传热等复杂问题。这些问题的成功求解最大限度地表现了STAR-CD的强健性。

STAR-HPC：高性能解算器

STAR-HPC是STAR-CD的高效分布式内存版本，用来在并行机或 (UNIX、NT、LINUX) 工作站集群上使用。它采用的多种系统上运行的消息传递 (MP) 并行技术适用于包括工作站集群、SMP服务器、MPP系统、NUMA系统以及使用矢量优化的超级计算机。STAR-HPC对很大数目的CPU，都可获得 近乎线性的加速比。它通常用在高强度计算中，提高实际问题的计算效率。STAR-HPC获得了广泛的硬件平台的支持，并拥有STAR-CD的全部特点。



STAR-HPC运行环境

STAR-HPC采用GUI环境，可以通过按钮来增加或减少处理器数目。它的设计使得无论是2个还是200个处理器，其并行化设置始终是对用户透明的。

强大的域分解能力

STAR-HPC采用强大的域分解方法，对多个CPU分配工作负载。它包括了域分解选项，提供灵活与最优的计算匹配。

大尺寸模型计算

使用STAR-HPC几百万个单元的模型可以在合理的时间范围内求解。例如，STAR-HPC还被用来求解奔驰E级车的外部空气动力模型，计算包括1000万个网点。计算分析的结果表明使用HPC求解大规模的网格点能够得到与实验同精度的所有重要相关物理现象。

杰出的可伸缩性

为测试STAR-HPC的性能，CD进行了许多数值试验。结果表明在商用32节点的计算平台上，STAR-HPC具有近线性的加速比。这也适用于具有良好节点间通讯能力的任何平台。个别情况下，还显示出了带缓冲器加速的机器的超线性加速比。对大型算例，最新的计算表明对64个CPU的机器而言可以获得57倍的加速度。

STAR-HPC的工业应用

许多业界领先的公司都在使用STAR-HPC来减少CFD的计算时间，并用精细网格来提高计算精度。ICI公司说：“在没有额外增加硬件情况下，STAR-HPC在我们的工作站集群上，极大地增加了计算能力与易用性。”

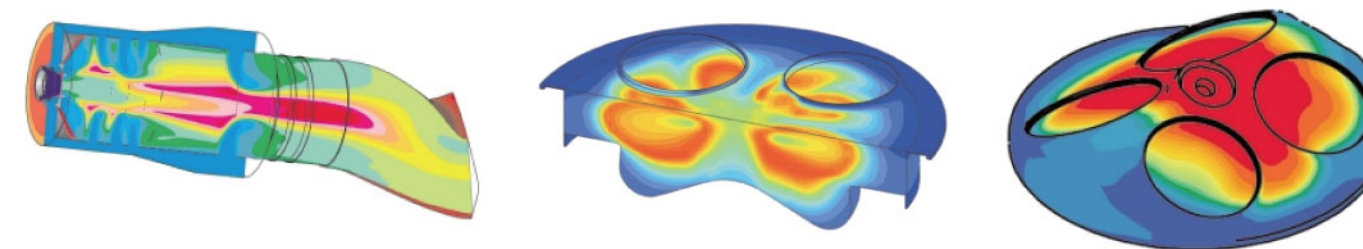
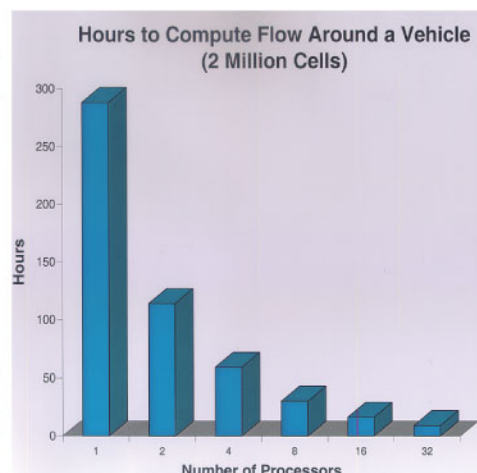
Benz公司认为：“STAR-HPC在汽车开发过程的早期阶段，提供了比以前好得多的设计质量。为获得更高的精度需要使用1000万个单元来分析汽车空气动力学问题，只有采用并行的CFD代码才使这些大规模的问题可以很经济地求解。”

STAR-CD 的燃烧模型

STAR-CD提供了一整套分析燃烧相关问题的物理模型。为分析燃烧过程，它提供了一系列化学反应处理方法。最基本的是使用阿氏反应速率方程(Arrhenius kinetics)的有限反应速率(finite rate)模型。另外提供涡破裂(eddy breakup)混和控制(mixing control)模型，与两种混合方法：反应速率(kinetics)/涡破裂组合方法与组合时间尺度方法。同时STAR-CD提供基于即混即燃平衡火焰或层流火焰的PPDF模型。对于更特殊的应用，提供了煤燃烧模型。这些燃烧模型均有进行热NO_x的后处理。

喷雾燃烧处理采用与周围流体的质量、动量、能量耦合的拉氏(lagrangian)统计近似。同时提供处理液滴蒸发、破裂、碰撞及湍流色散的子模型。STAR-CD还能让用户自己添加所需的模型。湍流模型可以采用标准k-ε模型、RNG模型或Chen氏k-ε模型、LES大涡模型、K/L模型等。边界层内可以采用壁面函数或两层模型。

用户可以用自定义子程序修改甚至代替多数物理模型。例如：可以在STAR-CD中使用其子程序来模拟燃气轮机燃烧室中的先进的燃烧化学机制，进行NO_x生成预测，取得良好效果。



燃烧计算的强大功能

STAR-CD增加了许多新的燃烧与雾化模型，除了CD公司与帝国理工学院的最新研究成果外，还吸收了Wisconsin大学发动机研究中心发展的KIVA代码的优秀模型。

除了前述的燃烧物理模型以外，还包括如下重要模型：

高效喷嘴模型

该模型产生基于喷嘴几何参数的初始喷雾分布。它是基于柴油机喷嘴的实验观察与经验分析，可以用到其他类型的喷嘴中。当然用户可以根据喷嘴的几何尺寸和喷射速率建立描述液滴分布及其特征的模型。

O'Rourke液滴碰撞模型

采用统计近似计算液滴间碰撞的影响。随当地条件不同，碰撞可能导致融合也可能只是简单的动量传递。O'Rourke的模型与KIVA-II中使用的一样。

Bai与Gosman 液滴壁面刺入模型

基于经验修正，Bai与Gosman提出了液滴与壁面发生相互作用的关系式。液滴无论是粘附到固体表面或者飞溅、破裂、反射等，均依赖于当地条件进行计算，无须由用户预先定义液滴与壁面的作用方式，使用户更加精确地模拟壁面的两相流流态。

液滴破裂模型

可以采用另外四种液滴破裂模型：Nicholls模型、Reitz-Diwaker模型、Pilch-Erdman模型与Hsiang-Faeth模型。每一种模型都大量采用经验数据表述不同流动情况的液滴破裂。Patterson液滴畸变与阻力模型

液滴周围的气动力导致液滴形状的畸变。当液滴的形状影响其阻力特征时畸变可以改变其斜率。该模型由Wisconsin大学发展应用Taylor类比破裂(TAB)模型来分析畸变，并用结果修正阻力计算。

液滴沸腾模型

液滴的沸腾过程可以从临界温度等参数的设定来描述。

热NO_x模型

STAR-CD特别关注燃烧对环境排放的影响，扩展Zel'dovich模型的机理形成了该模型的基础。为决定Zel'dovich格式所需的辐射组分的浓度，假设N原子的浓度已达到正常状态，其中O，OH，O₂与N₂O假设为平衡，H为部分平衡。



煤烟构成/氧化模型

Hiroyasu煤烟模型是该部分描述的基础。该模型认为在煤烟形成与氧化过程相互作用之间，煤烟的净生成质量率是一个单步过程。在Wisconsin大学的处理中氧化速率的阿氏表达式被替换为经验决定的速率模型，它是由Nagle与Strickland-Corstable提出的。

煤燃烧模型

此模型包含煤粉挥发，气相反应（包括再燃），和焦化过程的描述。此外还包括Lockwood和Shah提出的离散式辐射模型。

烟灰、颗粒形成模型

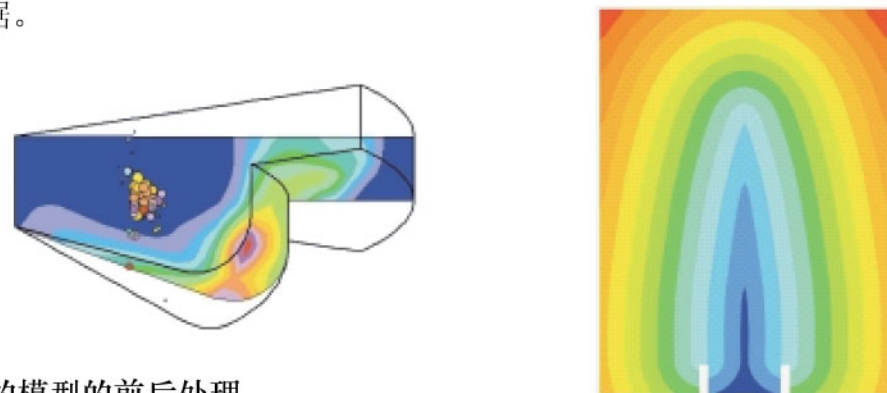
此模型根据Mauss等提出的理论描述烟灰和颗粒的形成机制。

壁面传热模型

导出了可压缩湍流的温度壁面函数。包括气体密度变化与湍流 Pt 数在边界层内的增加。

片状平衡火焰PPDF模型

对于湍流扩散燃烧，例如燃气透平和加热炉工况，目前STAR-CD采用平衡计算模型，在不久的将来，美国国家宇航局NASA Glenn 实验室将提供非平衡燃烧模型，同时用户需要输入小火焰（flamelet）的数据。



平衡火焰PPDF的模型的前后处理

NASA Lewis中心的CEA热化学代码的修改版本，被用来构成平衡PPDF模型所需的组分浓度多项式与初始燃油浓度多项式的关系。

CFM-INTFS与Weller火焰区域模型

该模型应用SI发动机的均匀火焰的燃烧过程，其中火焰被假设成为把反应物与生成物分开的无限薄的表面，而且外界力例如湍流，可以扰动火焰传播的表面。燃烧过程变成了求解输运方程在火焰表面的传播过程。

快速平衡解算器

在保持多重反应的精度的同时，减少燃烧计算负担的一种方法是把快、慢反应分开，用有限运动速率求解慢速反应，快速反应则近似为平衡化学反应。为满足这些要求STAR-CD提供了固定的与O, H, OH, N, CO, O₂, H₂, N₂, H₂O与CO相关的6个化学反应。

多步化学动力学

STAR-CD支持的有限速率或涡破裂化学反应的步数增加到N步。

STAR-CD和DARS耦合模块

目前，STAR-CD与DARS的接口正被开发，这样，STAR-CD可描述复杂的表面和体积化学反应，而且可实现流体和化学反应的全耦合过程。此耦合模块将在汽车、电力、化工、环境等领域起到关键的作用。

应用于内燃机的燃烧模型

内燃机中缸内的燃烧过程涉及到许多复杂的物理化学变化过程，是流体数值模拟最具有挑战性的领域。STAR-CD是该领域最成功、应用最广泛的分析工具，已经广泛应用于全球几乎所有的大型汽车/内燃机企业中。通过数值模拟可以得到缸内的流动特性（包括燃油雾化、破碎、蒸发、撞壁，传热过程），化学产物的浓度分布，压力场，温度场，放热率等重要参数，这对于新一代低排放内燃机的研究（满足欧洲III号，IV号标准），新的供油系统（共轨，泵喷嘴）分析，新的燃烧方式（HCCI）的探索，从而建立新的设计体系极为重要。

对于均质充气汽油机，采用的燃烧模型有涡破碎模型，皱褶火焰模型，拟序火焰模型。对于分层进气汽油机，采用涡破碎模型。柴油机采用涡破碎模型和层流湍流时间尺度模型。在汽油机和柴油机燃烧模拟所选用的涡破碎模型中，主要区别在于其经验系数不同。汽油机的爆震模拟采用4步shell模型。

下面对以上燃烧模型做简要介绍。

涡破碎模型（Eddy break-up model）

在湍流燃烧时，燃料蒸气和氧气均以大小不等并做随机运动的涡团形式存在，燃烧在这两类涡团的界面上进行，因此反应速率取决于两类涡团破碎成Kolmogorov尺度的速率。

皱褶火焰模型（Weller flame wrinkling model）

认为燃烧是发生在皱褶火焰面上，燃烧是通过皱褶火焰面积，层流火焰速度和已燃气体密度三者的乘积来计算。

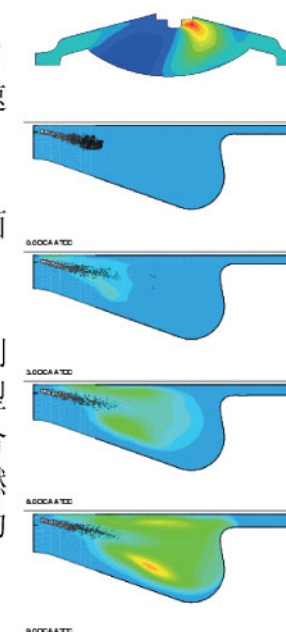
拟序火焰模型（Coherent flame model）

可以用拉格朗日方式在运动坐标系中考察拟序结构从生到灭的全过程来计算燃油与氧气的混合速率。在火焰面燃烧模型中，对每一计算单元可分成两部分，即非预混合部分和预混合部分，预混部分包括预混燃料和氧，非预混部分包括非预混燃料，其它的气相组分均匀分布在单元中，对非预混火焰的反应速率由混合速率决定。

拟序火焰拓展模型（Extended Coherent flame model）

Extended Coherent Flame Model作为STAR-CD新增的燃烧模型（ECFM和ECFM-3Z），克服了传统的单一混合燃烧模式的局限。ECFM模型不受混合模式的影响，对不论是“预混”、“部分混合”还是“非混合”模式同样有效。

ECFM模型主旨在于解决由直喷（DI）发动机带来的挑战。标准模型（例如早先的CFM模型）通常不容易应用于DI发动机，ECFM模型则不受此限制，对所有混合物模式均有效。ECFM模型同样可应用于GDI、HCCI和DI Diesel等多种发动机，具有广泛的适应性。



ERC 燃烧模型

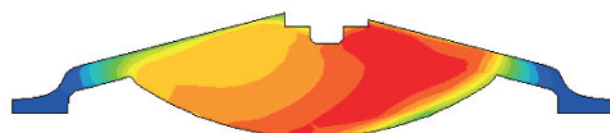
该模型由威斯康辛—麦迪逊大学内燃机研究中心主持开发。目前该模型主要包括燃料喷雾破碎、点火、燃烧、碳烟和NO_x排放、壁面传热、活塞环缝隙流模型。

层流湍流时间尺度模型 (Laminar and turbulent characteristic time scale model)

这一模型在汽油机和柴油机的燃烧模拟上都可以应用。组分m的反应速率利用组分m的质量分数与组分m的质量分数的局部瞬时的热力学平衡值的差值与特征时间之比来表示。反应特征时间是考虑有限反应速率（实际情况）与无限反应速率（平衡状态）的偏离，由于平衡状态的特征反应时间为零，因此可用特征反应时间来代表真实反应与理论反应的偏差程度，也就是说特征时间是反应完成平衡所需的时间。为了精确计算平衡温度，一般取7种组分，即燃料，O₂，N₂，CO₂，CO，H₂和H₂O。

Shell自燃模型

Shell模型是在退化分枝链锁反应机理基础上提出的8步反应，通过链引发，链传播，线性链中断，二次链中断，退化支链过程来表述自燃过程。当温度大于某一固定值如1100K 或者温度随时间变化大于106 K/s时自燃过程停止，燃烧开始。自燃模型可以模拟冷火焰的传播，两级自燃。通过控制温度来控制从两级自燃到一级自燃。



NO_x模型

包括Thermal 模型，Prompt模型和Fuel模型。

Thermal模型中NO_x通过空气中的N₂和O₂在高温下反应生成。反应机理是扩展了的Zeldovich机理。

Prompt模型中NO_x是由于碳氢原子团和空气中的氮反应生成。它受温度影响小，在通常情况下，Prompt生成的NO_x占总的NO_x比例很小，可以不考虑。它不受Zeldovich机理控制，而是通过碳氢原子团生成，在浓混合气火焰中，CH原子团比较多，有利于它的生成。

Fuel模型NO_x是由于燃料中的氮组分和氧反应所生成。对于煤和重油的燃烧，燃料中的氮是NO_x排放的一个重要的组成部分。

在内燃机中只出现Thermal模型和Prompt模型。

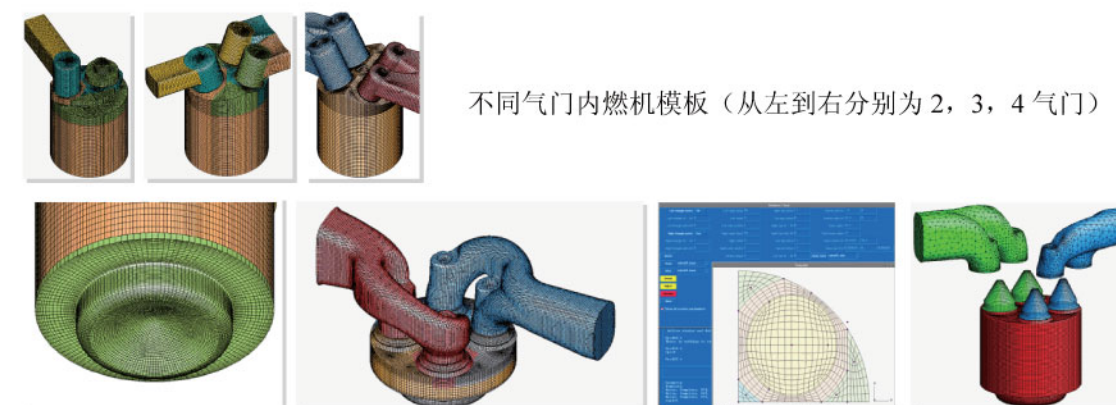
Soot模型

柴油机上soot生成速率是由生成速率和碳烟氧化速率两部分所组成。碳烟生成率采用Khan-Hiroyasu-Belardini公式计算，碳烟的氧化速率采用Nagle-strickland-Constable公式计算。

ES-ICE 内燃机运动网格专用生成工具

ES-ICE是生成内燃机运动网格的专用的生成工具，通过与STAR-CD结合，可以研究内燃机缸内的气体流动特性，燃烧过程和排放污染物的生成。ES-ICE适用于二气门，三气门，四气门和五气门的内燃机。ES-ICE能够自动生成STAR-CD在计算时所需要的所有文件，节省了用户的时间。ES-ICE与STAR-HPC结合可以实现并行计算，ES-ICE自动对计算区域划分。

ES-ICE是基于参数模板的软件包，通过选取合适的参数，生成模板，然后将几何形状映射到模板上，使模板形状完全吻合用户所要的几何形状，生成网格。对于特别复杂的几何形状，比如气道和燃烧室等，用户可以利用其它工具如PRO-AM或者ICEM生成网格后，再将数据读入ES-ICE，两者合并。



不同气门内燃机模板（从左到右分别为2，3，4气门）

外部生成网格与模板结合（左为燃烧室，右为气道）

2D-模板的生成

气道生成的stub方法

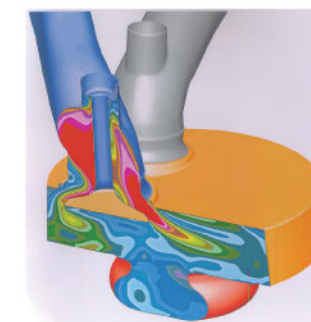
ES-ICE提供了Trimming和Mapping两种生成网格的方法

Trimming方法是采用PRO-AM的切割网格的方法，将模板切割到几何表面，生成网格主要包括五步：

- 对几何形状单元分为特定的单元类型。
- 对几何形状做特征线。
- 生成2D模板。
- 生成3D模板。
- Trimming 3D模板到几何形状上。

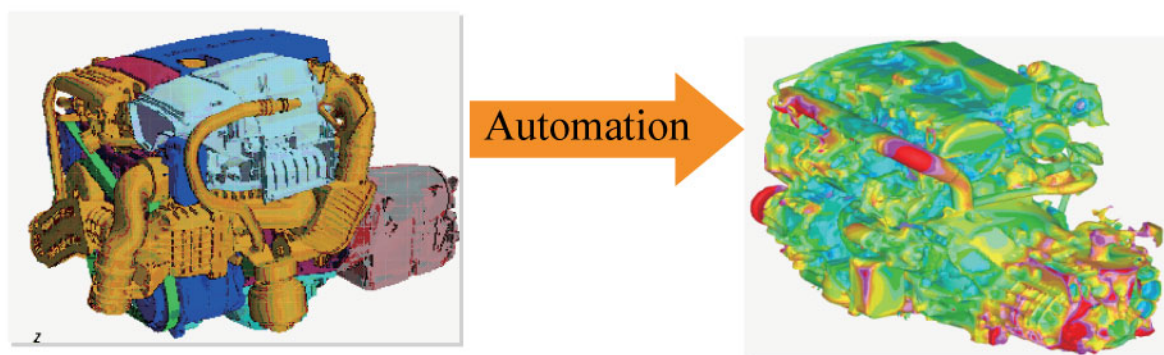
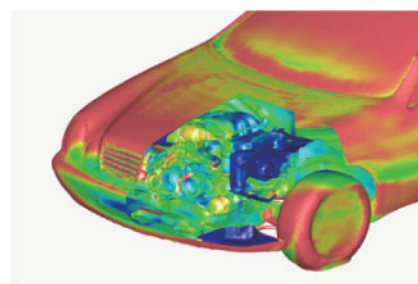
Mapping方法采用将几何中的spline和shell与模板中的edge和patch投影对应的方法，将模板投影到几何上，使两者吻合，生成网格包括下面主要五步：

- 生成2D模板
- 生成3D模板
- 对模板和几何分别生成特征线和patch
- 将3D模板投影到几何上
- 生成活塞的网格



ES-Uhood 汽车发动机舱热管理专家网格模块

ES-Uhood是为汽车发动机舱热管理开发的专用前/后处理器，与STAR-CD相结合，可以研究汽车发动机舱内的流动、散热情况。ES-Uhood善于处理复杂的大型CAD模型，其表面Wrapping功能专为快速的表面网格修复设计，大幅缩短研发周期。其使用PRO-AM的内核，利用一系列专家参数，自动生成体网格。

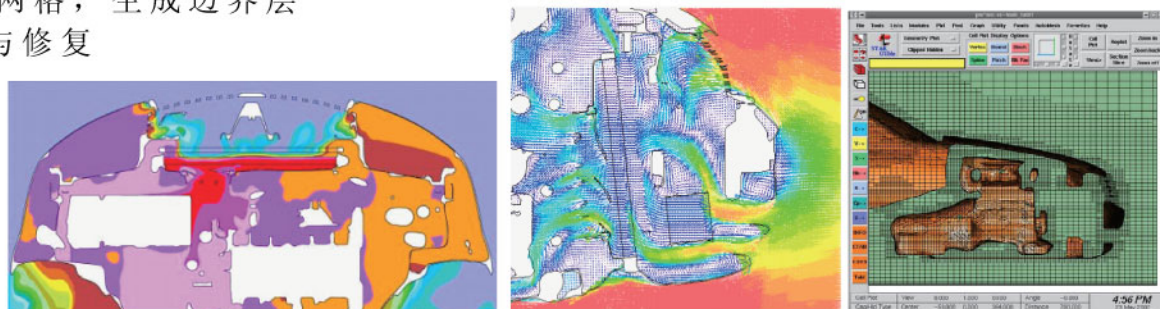


ES-Uhood生成以六面体为主的Trim网格，又采用逐步粗化来切分汽车周围流场区域，使得网格数量远低于四面体网格。使短时间内进行多工况分析提供保证。

ES-Uhood使用导航器操作，操作方便，流程清晰。并可对风扇模型，热交换器模型进行自动装配。若使用Vehicle Thermal Management (VTM)用户子程序，可以加载风扇的阻力系数，求解热交换器内工质的二次流动。

步骤：

1. 导入几何文件
2. Wrapping方法包面
3. 生成subsurface，为拉伸边界层网格做准备
4. 生成网格模板 (custom mesh)
5. 完成Trim网格，生成边界层
6. 网格检查与修复
7. 解析设定
8. 计算实行
9. 后处理



ICEM CFD TETRA / HEXA - 四面体/六面体网格生成工具

ICEM软件包模块及功能说明

ICEM CFD系列产品是包括基于复杂几何的曲面造型和非结构化的网格自动生成以及计算结果后处理的专业CFD前后处理软件包，它是对STAR-CD的前后处理模块PROSTAR的有效补充。二者配合使用，将极大方便用户提高建模速度。

它拥有功能强大的线框图、三维曲线、常规与NURBS曲面等的生成与修改能力。它可以采用一系列标准格式与众多的CAD软件实现数据交换。它的开放的几何数据结构能够给用户对不同格式网格进行组合的适应能力。

作为业界领先的CFD前后处理软件包，ICEM CFD已被广泛应用于汽车、电子、化工、航空、航天、旋转机械、机械制造等行业。

采用ICEM CFD的非结构化网格生成器，可以克服结构化网格在复杂曲面适应能力上的缺点，自动生成和自适应加密四面体或三角形单元的网格。用户只需要简单选择描述分网空间的CAD几何，确定表面和空间最大单元的尺寸，它就可以进行连续的划分直到所有控制参数都得到满足。

重要特点有：

- 不需要初始网格，它直接采用Octree从CAD表面进行运算。
- 近壁可以采用棱柱型网格，从而更好的模拟近壁流动。
- 自然尺寸选择，当用户选择的单元尺寸不能充分表征几何特征的时候，软件可以自然地进行亚尺度的网格划分。
- 网格质量的自动控制。包括顶点的融合等特征检查，对生成的网格进行自动光滑，从而得到最终的高质量网格。

ICEM软件包括如下模块

ICEM DDN复杂曲面造型模块

ICEM DDN Mesher Interface网格生成器接口模块

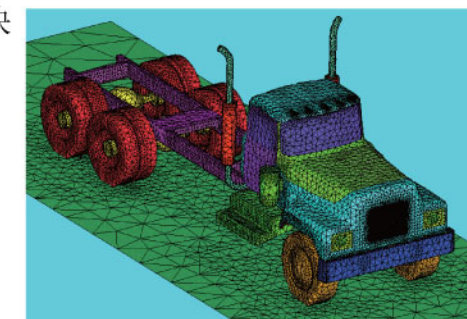
ICEM Tetra Mesher非结构化网格生成器模块

ICEM Translator 网格数据转换器

ICEM Unput 非结构化网格生成器的输入模块

ICEM Visual 3 高性能的动画后处理模块

ICEM DDN复杂曲面造型模块



它具有以下功能：

- 直接的CAD界面，完全独立于底层的网格生成器的表面块结构。
- 多种点输入方法，自动的NURB曲线与表面生成。
- 使用STL等格式，可以读入已有的非结构化的表面数据。
- 使用IGES，DXF等格式与其他CAD系统交换数据

ICEM DDN Mesher Interface 与网格生成器的接口模块

它被用来从CAD的几何数据生成网格生成器的输入文件。

ICEM Tetra Mesher 非结构化的四面体网格生成器模块

它使用基于OCTTREE技术生成四面体以及应用范围及其广泛的三角形表面单元。它适用于对CAD表面装配成的3D封闭体积进行四面体单元填充。生成的网格完全独立于底层的CAD表面结构。

它包括的模块有：Tetra Cutter，Tetra Smoother，以及交互式的Tetra Editor。

ICEM Hexa Mesher 六面体网格生成器模块

它使用基于分块技术的六面体网格技术可以快速划分六面体网格，并且可以进行六面体/四面体网格的融合。

ICEM Translator 网格数据转换器

用来通过不同的标准转换形成不同的最终网格，比如生成STAR-CD文件格式的网格。



ICEM Unput (UNstructured inPUT)

ICEM 非结构化网格生成器的输入模块

该模块的输入是一系列以STL或其他格式表示的三角形表面网格，用户可以：

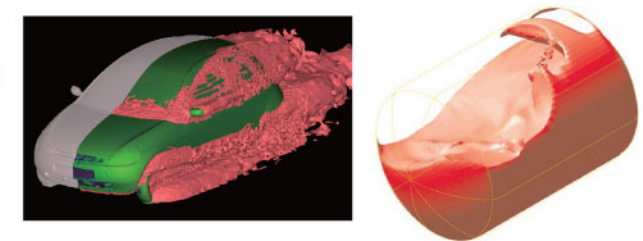
- 延伸已有的曲线、顶点、或表面。
- 按照材料不同对曲线和表面进行分类。
- 定义不同区域的材质。
- 生成TETIN (TETra Input) 文件，用来定义网格生成器的模型。

ICEM Visual 3 高性能的动画后处理模块

它是一个面向CFD的专业后处理器，采用了MIT开发的核心技术。它既包括传统的切平面，等值面，流线，也包括创新的基于对象的可视化操作。

STAR-CD 的工业应用全面的流体解决方案

- ◆ 增压器流动
- ◆ 乘员舱空调系统热舒适性分析
- ◆ 除霜/除雾分析
- ◆ 发动机舱热流体分析

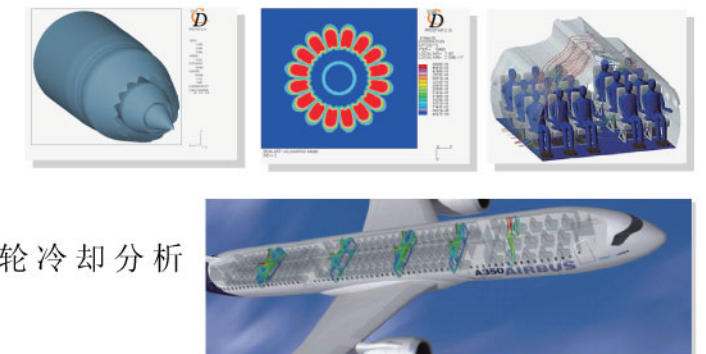


- ◆ 高速稳定性分析
- ◆ 刹车盘冷却分析
- ◆ 液力变矩器流动



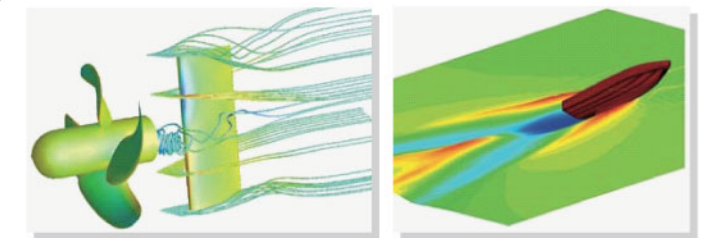
航空航天

- ◆ 飞行器外部阻力/升力分析
- ◆ 飞行器/动力系统一体化分析
- ◆ 进排气系统/机体干扰分析
- ◆ 矢量推力/反推力系统
- ◆ 武器发射/发动机干扰分析
- ◆ 喷气式发动机压气机、燃烧室、涡轮冷却分析
- ◆ 直升飞机旋翼/机体一体化分析

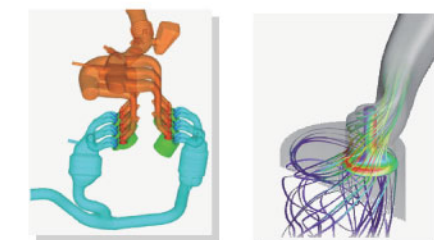


船舶

- ◆ 水面舰艇的自由表面流动阻力分析
- ◆ 螺旋桨/舵一体化分析
- ◆ 喷水推进技术
- ◆ 空化/空蚀分析
- ◆ 空化武器系统
- ◆ 水下武器发射
- ◆ 舰艇噪音分析
- ◆ 常规/核动力舰艇内部热分析

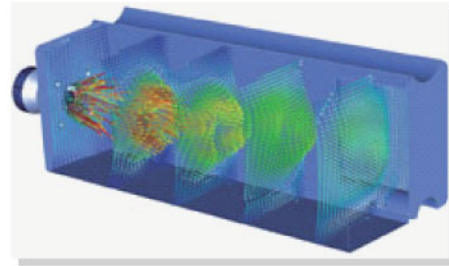


- ◆ 发动机冷却水套分析
- ◆ 发动机进排气系统分析
- ◆ 发动机缸内燃烧流动分析
- ◆ 发动机三维催化装置分析



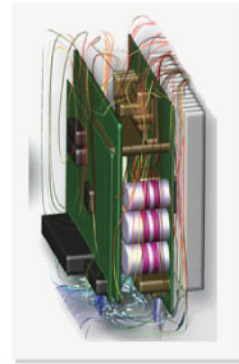
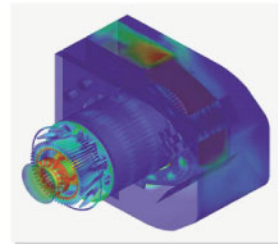
核动力

- 反应堆堆芯辐射/散热分析
- 水/钠冷却管路分析



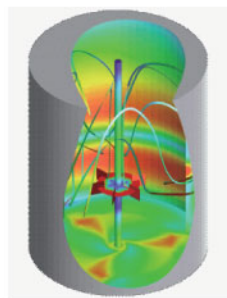
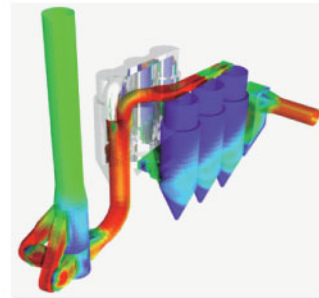
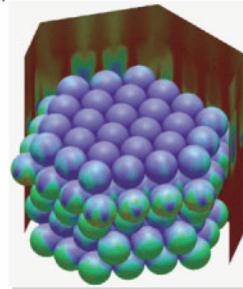
电气

- 黑色家电的元器件散热分析
- 洗衣机的波轮设计
- 空调系统的各种风机、泵、散热器的流动、噪音分析



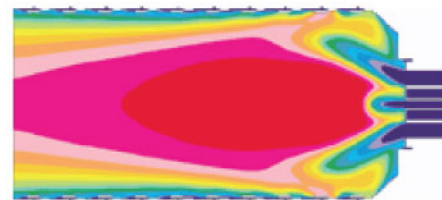
石油/化工

- 钻井过程的钻头流场分析
- 各种反应釜内部的热流体分析
- 阀门的开启/关闭过程分析
- 精馏过程对流分析
- 搅拌器流动
- 流化床/固定床反应器



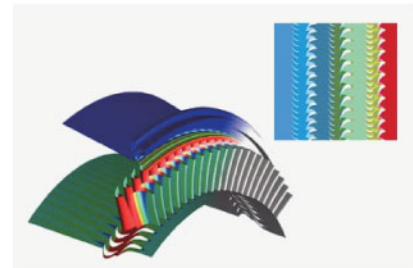
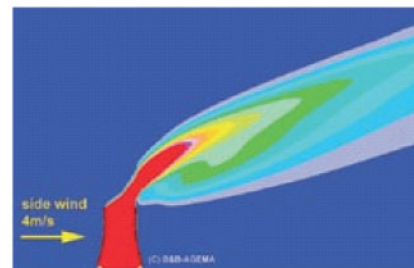
电力系统

- 燃油、燃气、燃煤锅炉内部的多组分、多步燃烧化学反应分析
- 换热器分析
- 冷却塔、烟囱的内外流分析
- 高低压蒸汽涡轮的两相流分析
- 水轮机的叶片、涡壳设计



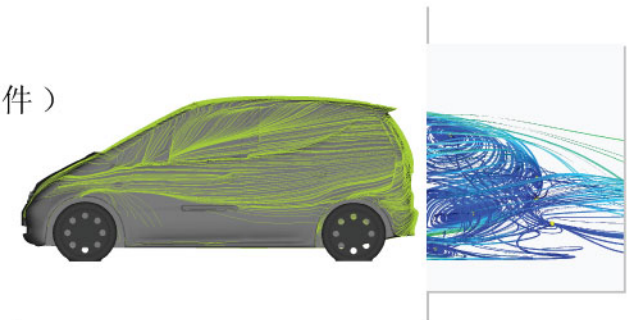
钢铁/重工业

- 热风炉的燃烧分析
- 旋风分离器
- 风机的风量、风压计算
- 送风管路系统设计
- 高炉内钢水包内的流动分析
- 熔化/凝固分析



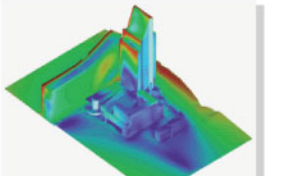
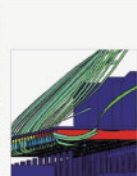
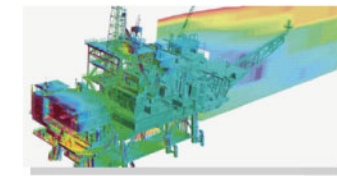
汽车工业

- 阻力分析（外形，底盘，后视镜，绕流部件）
- 气动噪音分析
- 油箱加注



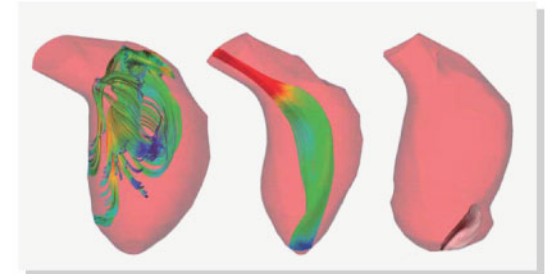
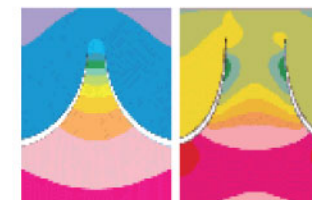
建筑/环境

- 建筑物的空调系统设计
- 建筑物的防火设施模拟
- 大气/河流/海洋的污染物排放、扩散分析
- 垃圾焚烧炉的燃烧分析



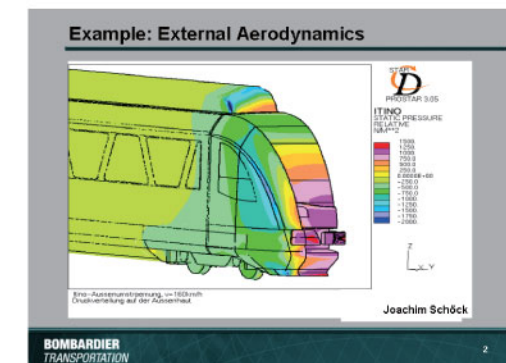
生物医学

- 人工心脏流动仿真
- 血管流动仿真



铁路系统

- 高速机车外形设计
- 高速列车侧风稳定性分析
- 机车/客车车辆阻力分析/噪音分析
- 受电弓高速稳定性分析
- 车辆/轮轨系统一体化流动分析
- 列车交会/进入隧道气动力分析
- 列车内部空调系统舒适性分析



[1] GT-SUITE系列软件是由美国Gamma Technologies公司开发。

[2] modeFRONTIER是由ES.TEC.O公司开发。

[3] MPCCI是由法兰克福SCAI研究中心开发。

