

基于Star-CCM+二次开发的整车外流场数值模拟

Numerical simulation of vehicle external aerodynamic using Star-CCM+ redevelopment

周建军¹ 杨坤¹ 江兴贤²

(1. 上海汽车技术中心整车部 上海 安亭 201804;

2. 西迪阿特信息科技(上海)有限公司 上海 浦东 200122)

摘要: 整车外流场分析已经成为轿车开发中评价气动阻力与升力等指标的快速手段。通过STAR-CCM+软件的二次开发,把整车外流场分析程序化,可以提高整车外流场分析的工作效率、计算精度与结果一致性。程序应用于某开发阶段车型的外流场分析。

关键词: 整车外流场分析; 数值模拟; 二次开发; STAR-CCM+

Abstract: Vehicle external aerodynamic simulation is an efficient tool to evaluate the drag and lift force in vehicle development. Redevelopment with Star-CCM+ can improve the simulation efficiency, accuracy and result consistency. The developed program is used for a developing vehicle project.

Keywords: vehicle external aerodynamic analysis; numerical simulation; redevelopment; STAR-CCM+

计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, 简称CFD), 是一门通过将时间离散为时刻, 将空间离散为网格结点, 把物理变量离散到网格点上, 进而得到离散形式的流体力学基本方程, 通过计算机求解得到其近似数值解, 来研究流体运动规律的学科。随着计算机技术的飞速发展, 计算流体力学已经广泛应用于航天航空、船舶、汽车、水利、环境、建筑以及机械制造等领域。

整车气动性能是汽车空气动力学的核心问题, 在造型阶段, 气动性能主要关注车辆的阻力系数和升力系数。汽车外流场属于不可压空气的钝体绕流, 流动尺度跨度大, 各局部的流动特征差异大, 尾部和底部的流场十分复杂, 局部的非定常性很强。汽车空气动力学与航空空气动力学有很大的不同, 在航空空气动力学中各个部件可以相对独立地进行研究, 各部件间的相互作用也可以进行系统地评估; 而汽车外流场则不同, 必须从整体进行考虑。并且在汽车的气动性能达到一定程度后, 很难再通过对各个局部的分别优化使其气动特性进一步较大幅度提高。所以, 如何在造型阶段控制整车阻力系数是整车气动性能开发工作中的重中之重。

在我国大力提倡自主创新、自主研发的背景下, 汽车行业新车开发项目越来越多。在新车开发中, 用CFD的方法对整车外形进行气动力的分析已经成为整车开发前期对气动性能进行评估的有效手段之一。为了快速响应项目的进展, 提高外流场分析的精度与一致性, 本文基于Star-CCM+进行了一些研究与二次开发, 试图将造型阶段的CFD外流场分析流程自动化。

1. 整车气动性能分析简介

流体力学有以下三个基本方程，分别为：

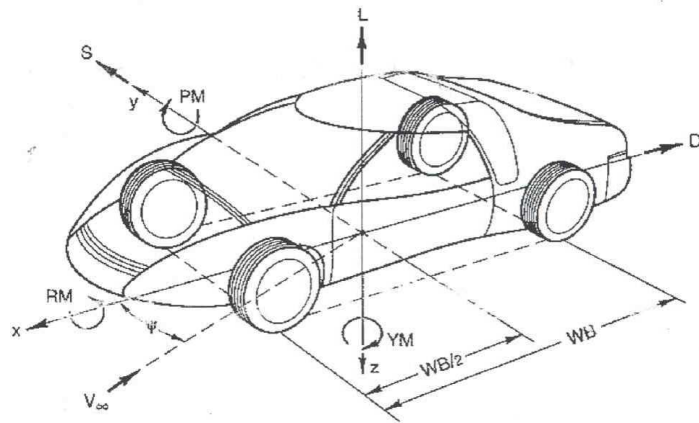
$$\text{连续性方程: } \frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \vec{V} = 0$$

$$\text{Navier-Stokes方程: } \frac{D\vec{V}}{Dt} = f - \frac{1}{\rho} \left(\mu' + \frac{1}{3} \mu \right) \nabla (\nabla \cdot \vec{V}) + \frac{1}{\rho} \mu \nabla^2 \vec{V}$$

$$\text{能量方程: } \frac{De}{Dt} = -P \frac{D}{Dt} \left(\frac{1}{\rho} \right) + \phi + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + q_R$$

通常，在计算整车的气动性能时，只求解前两个方程，而不考虑能量方程。在整车相关的流动现象中，绝大多数情况下马赫数 $M < 0.3$ ，可以认为流体是不可压缩的。其中， $M = \frac{u}{a}$ ， u 为流体运动速度， a 为当地声速。当车速为120KPH时对应的马赫数约为0.1。马赫数 M 的大小反映了流体的可压缩性， M 越大流体的可压缩性越强。

整车气动性能参数有阻力系数 C_d ，升力系数 C_l ，前升力系数 C_{lf} ，后升力系数 C_{lr} 。



整车坐标系

$$\text{阻力系数: } C_d = \frac{\text{Drag}}{Q_\infty A} \quad \text{升力系数: } C_l = \frac{\text{Lift}}{Q_\infty A}$$

$$\text{俯仰力矩系数: } C_{pm} = \frac{\text{Pitching Moment}}{Q_\infty A \cdot D}$$

$$\text{前升力系数: } C_{lf} = C_{pm} + \frac{1}{2} C_l$$

$$\text{后升力系数: } C_{lr} = \frac{1}{2} C_l - C_{pm}$$

公式中： A 为参考面积， $Q_\infty = \frac{1}{2} \rho V^2$ ， V 为流体运动速度。

2. 基于Star-CCM+ 的整车外流场分析流程

STAR-CCM+是CD-adapco公司采用连续介质力学数值技术（computational continuum mechanics algorithms）开发的新一代CFD求解器。除了求解器，它搭载了CD-adapco最新网格生成技术，可以完成复杂形状数据输入、表面准备——如包面（保持形状、简化几何、自动补洞、防止部件接触、检查泄露等功能）、表面网格重构、自动体网格生成（包括多面体网格、六面体核心网格、十二面体核心网格、四面体网格）等生成网格所需的一系列作业。STAR-CCM+采用JAVA语言编写，实现跨平台的用户界面，同时用户可以用Java语言编写子程序，自定义边界条件、源项和后处理函数等。本文正是应用STAR-CCM+的JAVA开放接口实现了整车外流场分析的二次开发，实现从模型导入、模拟风洞的建立、边界条件的设定、网格划分、求解以及后处理的自动化处理。

程序把整个分析过程分为6步，图1为第1步的界面，这一步主要用于选择输入文件，并指定模型的长度单位，点击“Import”按钮导入分析几何模型。

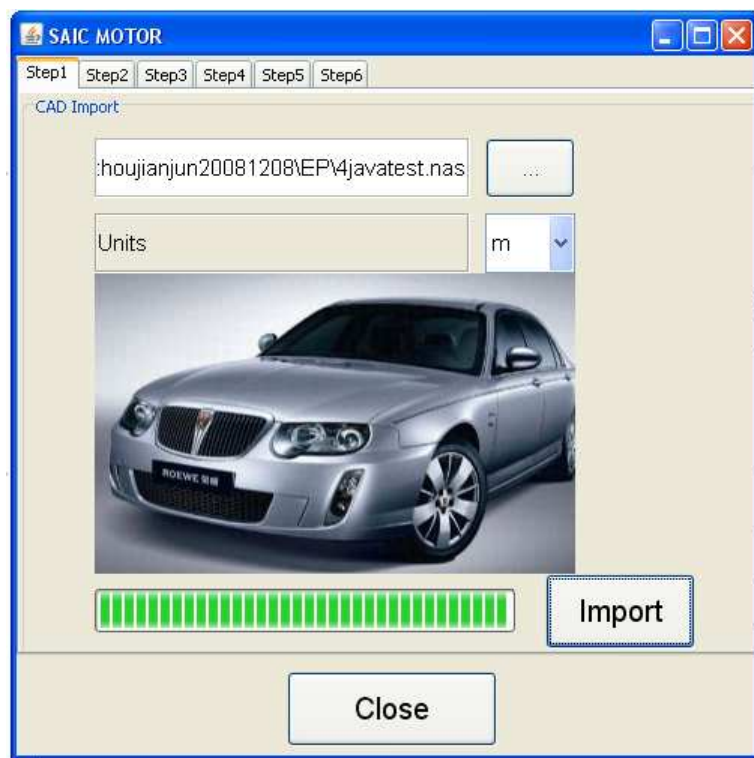


图1 第1步的界面

图2为第2步的界面，这一步通过输入2个坐标点构造出一个长方体的流体域，程序识别输入的模型尺寸，再根据公式计算出这两个点的默认值。用户也可以根据实际情况输入坐标值。

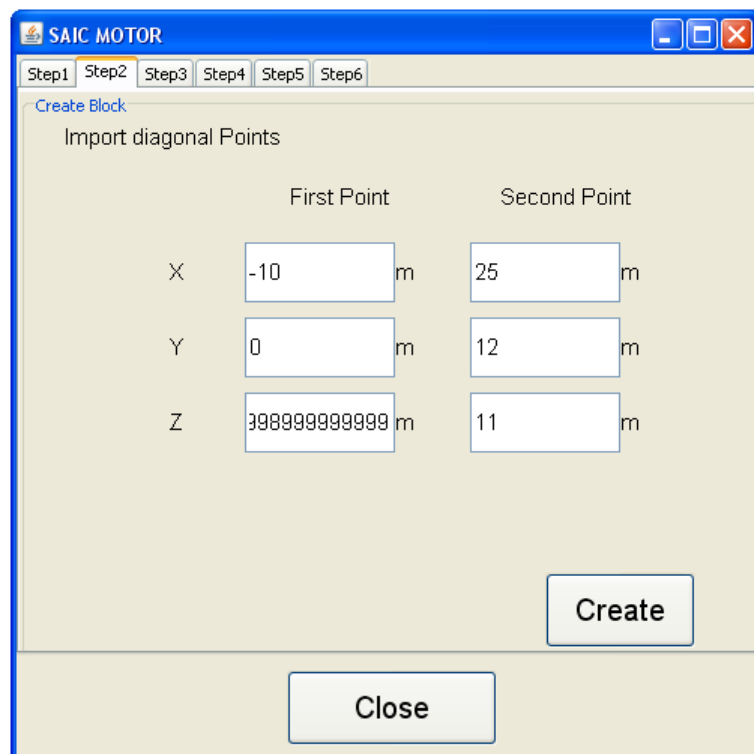


图2 第2步的界面

图3为第3步的界面，用于设定分析模型在STAR-CCM+中的定义，包括速度进口，压力出口，对称面，滑移面及固定壁面。经过第2和第3步操作后的模型如图4所示。

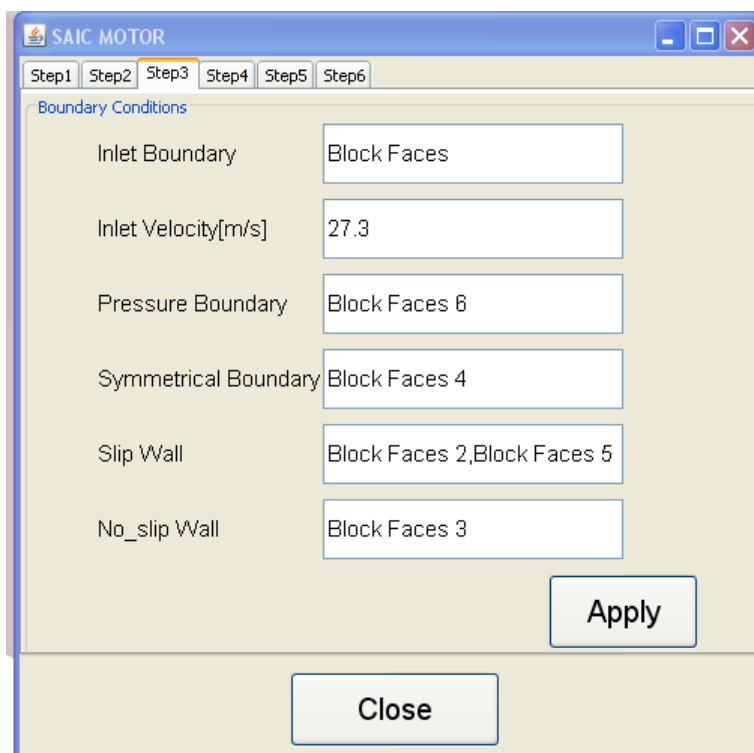


图3 第3步的界面

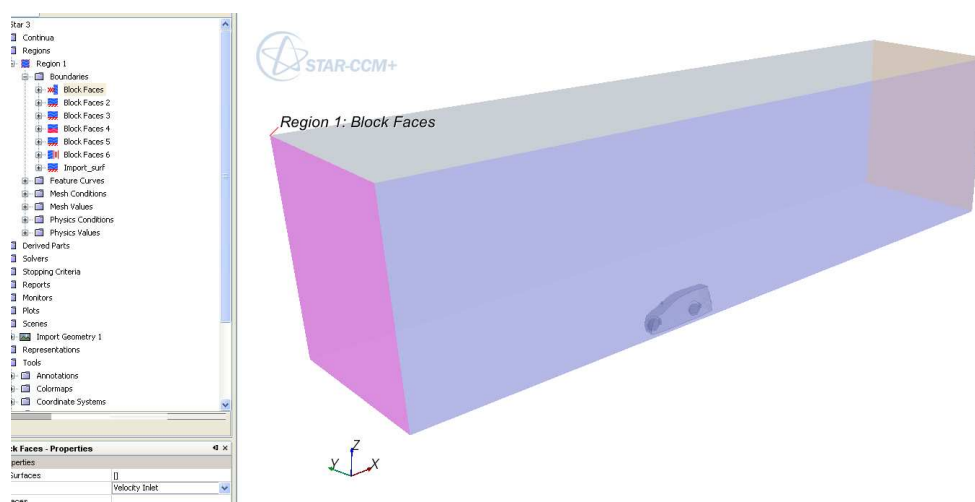


图4 建立并定义了计算域边界的模型

图5为第4步的界面，这一步对网格划分的控制参数进行设定，如网格大小，边界层层数与厚度，网格单元的离散类型等。同时可以用“Shape Refine”按钮进行网格加密，加密部位在车的前部，后部及底部。定义完成后用“Generate”按钮启动网格生成。

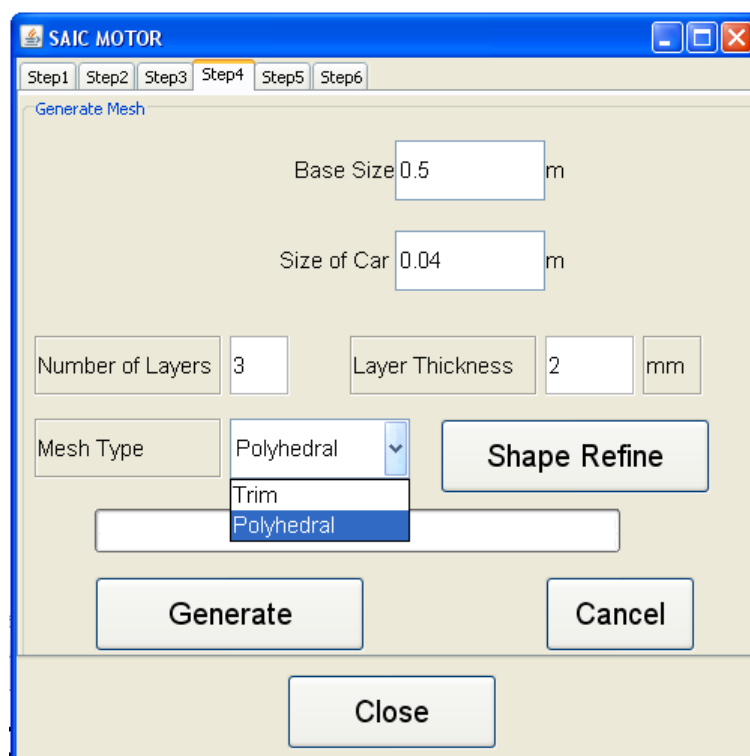


图5 第4步的界面

图6为第5步的界面，用于生成一些辅助截面，显示计算结果，如流体速度的截面图，压力截面图等，用于计算过程的实时监控与后处理。

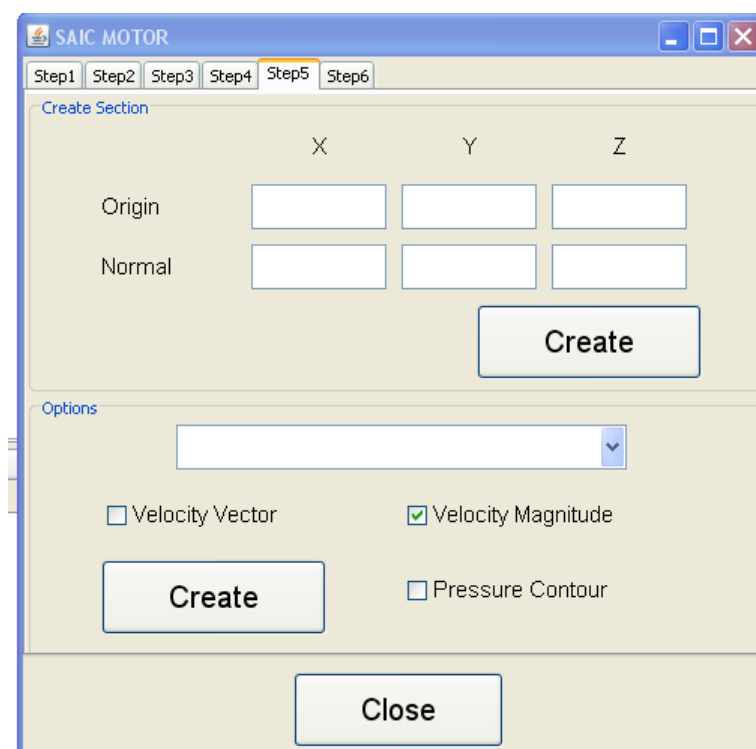


图6 第5步的界面

图7为第6步的界面，用于指定最大迭代步数及启动求解计算，计算完成后可以显示车体表面压力云图及阻力系数，升力系数等整车空气动力学性能指标。

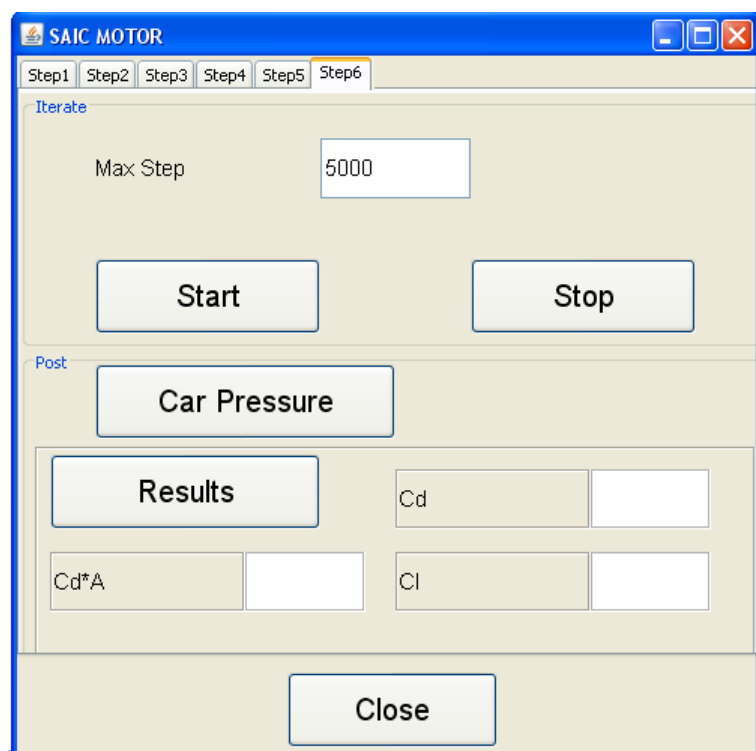


图7 第6步的界面

3. 应用实例

把程序应用到一个车型的气动性能分析中,拿造型完成的外表面,在CATIA中进行简单的处理,就可以启动程序导入到STAR-CCM+中,在完成上述1—4步后,需要用STAR-CCM+网格检查功能检查一下网格质量,如果由于几何面比较复杂导致网格质量不好,需要对网格进行人工处理,一直到网格质量达到要求,然后就可以进行上面step5和step6的操作。在这次计算中,从得到CAD数模到完成模型处理递交计算只用了2个小时。计算收敛后得到结果,图7为车辆外表面气动压力云图。

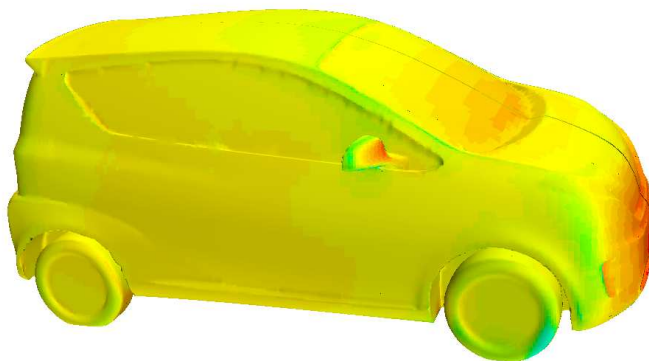


图8车外表面气动压力云图

4. 结论

通过这个系统在上述车型及其他项目的应用,可以发现:

1) 应用开发的程序进行整车简易模型外流场分析,可以在2小时左右处理完模型递交计算,比较完全手动界面操作工作效率提高了30%--50%。

2) 由于程序把模型的参数设置固化下来,在控制好模型网格质量的基础上,计算精度和一致性得到了保证。

5. 参考文献

- [1] 黄向东,《汽车空气动力学与车身造型》,北京:人民交通出版社, 1999
- [2] 傅立敏,《汽车空气动力学》,北京:机械工业出版社,2006
- [3] 王福军,《计算流体动力学分析》,北京:清华大学出版社,2004
- [4] H.K.Versteeg, W.Malalasekera, An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite volume Method. Willey, New York, 1995
- [5] S.V.Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere, Washington, 1980
- [6] CD-adapco Inc., STAR-CCM+ User's Guide. CD-adapco Inc., 2008

周建军: 男, 1968年出生, 工学硕士, 高级工程师职称, 现为上汽股份技术中心整车集成部主任工程师。电子信箱: zhoujianjun@saicmotor.com