基于 STAR-CCM+的跑车减阻设计

The Sports Car’s Drag Reduction Design Based on STAR-CCM+

张英朝 邵书鑫 赵婧 靳广垠

吉林大学汽车动态模拟国家重点实验室

吉林大学教育推进伙伴计划（PACE）中心

摘　要：应用 STAR-CCM+软件对造型优化前后的跑车分别进行整体空气动力学仿真分析。通过对前期造型的仿真，获得了气动阻力系数，整车周围流场的压力云图和湍流动能图谱，发现了可能影响气动阻力系数的部位。优化这些部位后，进一步分析得出的数据表明我们的修改基本符合空气动力学原理，为造型设计及优化提供了一定依据。

关键词：跑车 造型优化 CFD STAR-CCM+

Abstract: Simulation analysis of the aerodynamics for a sports car modeling before and after optimization was introduced in this paper by using STAR-CCM+. In the first simulation, the drag coefficient, pressure of convective and turbulent kinetic energy spectrum were obtained, and the positions that maybe affect the drag coefficient were found. Further analysis inferred that our modifications accorded with the aerodynamic principles. These results can provide the basis for the modeling design and further optimization.

Key Word: Sports car, Modeling optimization, CFD, STAR-CCM+

1 前言

在过去的几十年中，随着计算机技术的发展，CFD 技术被广泛的应用到汽车设计中。汽车空气动力学对汽车和空气相互作用时的现象和规律进行研究[1]，汽车空气动力学指标是汽车（尤其是跑车）的重要参数，极大的影响着汽车的动力性、经济性以及操纵稳定性等。当车速为 60km/h 时，气动阻力与滚动阻力相等，当车速为 150km/h 时，气动阻力相当于滚

动阻力的 2~3 倍[1]。可见，作为追求高速度的跑车，研究气动阻力显得极为重要。从历史沿革上看，局部优化是降低汽车风阻系数的重要手段，在现代汽车设计中仍然有着举足轻重的作用。

本文应用 STAR-CCM+软件，对不同造型的跑车进行了整车外流场分析，通过比较来验证局部造型的修改是否有利于风阻系数的降低，为汽车减阻和空气动力学理论研究提供试验数据。STAR-CCM+是具有全新理念的新一代 CFD 软件，采用最先进的连续介质力学算法，并和卓越的现代软件工程技术结合在一起，拥有出色的性能、精度和高可靠性。其一体化的图形用户界面，从参数化 CAD 建模、表面准备、体网格生成、模型设定、计算求解一直到后处理分析的整个流程，都可以在同一个界面环境中完成，体现了高度集成化的优势[2]。

2 计算模型

2.1 基本理论

根据所研究跑车运动的实际情况，可以认为跑车的流场为三维、定常、等温、不可压、粘性、湍流流动，其控制方程为雷诺 N-S 方程。

质量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial u_i}(\rho u_i)=0$$

动量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\mu_i\mu_j)=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[(\mu+\mu_t)\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right]+\frac{\partial}{\partial x_i}\left[(\mu+\mu_t)\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right]-\frac{\partial}{\partial x_i}\left[p+\frac{2}{3}\rho k\right]$$

湍流动能方程：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\nabla\bullet(\rho \mathrm{U} k)=\nabla\bullet\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\nabla k\right]+p_k-\beta'\rho kw$$

湍流耗散方程：

$$\frac{\partial\rho w}{\partial t}+\nabla\bullet(\rho \mathrm{U} w)=\alpha_1\frac{w}{k}p_k-\beta_1\rho w^2+\nabla\bullet\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_{w1}}\right)\nabla w\right]$$

式中：u 为速度，μ 为动粘性系数，μ_t 为湍流动粘性系数，p 为压力，ρ 为密度，k 为湍流动能。在本文中 x_1 为空间坐标 x，x_2 为空间坐标 y，x_3 为空间坐标 z [3]。

2.2 计算模型

该计算模型包括车身外表面、进气格栅、外后视镜、出风口、前翼、尾翼、扩散器、排气管、车轮等影响气动阻力系数的主要部件，模型如图 1、图 2。

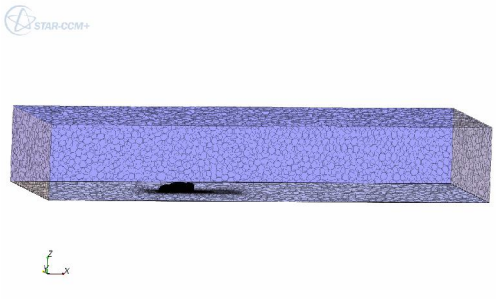

图 1 计算域

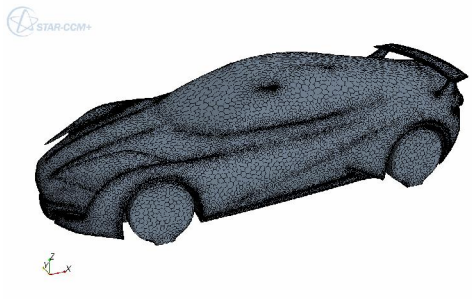

图 2 整车多面体网格

其中整车计算域的长宽高分别为 60m，20m，10m，整个数模应用 STAR-CCM+的包面和重构功能生成面网格，在进气格栅、后视镜、翼板等对气流影响比较大的部件进行了细化处理，在车身大面等对气流影响比较小的位置进行了简化，使得网格的数量控制在 1000 万以内。

造型优化前后车型效果图如图 3、4:

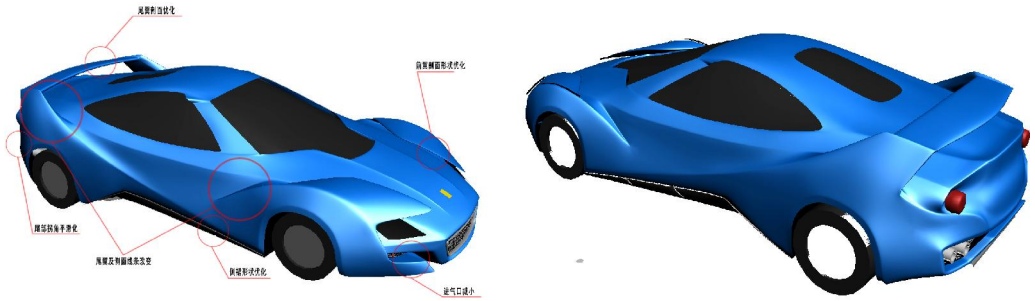

图 3 优化前

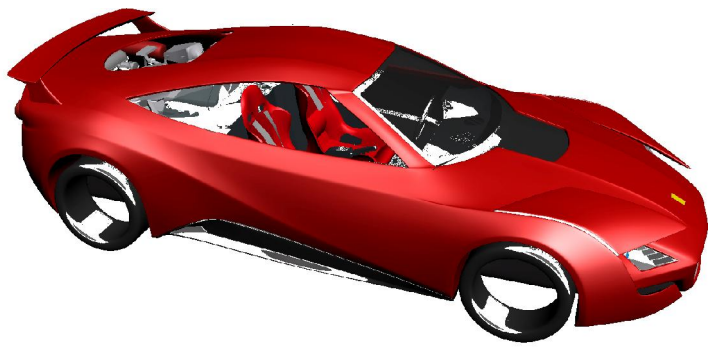

图 4 优化后

造型的优化部位主要是：前翼剖面形状优化，进气口减小，侧裙形状优化，尾翼及侧面线条改变，尾部拐角平滑化，尾翼剖面优化。

2.3 边界条件的设定

计算工况为汽车行驶时的流场分布，进风口（inlet）设定为速度入口边界，出风口（outlet）为压力出口边界，壁面为滑移面，无边界层，地面无滑移面，有边界层;来流速度为30m/s(108km/h)。

3 仿真结果分析

3.1 压力分析

优化前后的压力云图如图 5 和图 6：

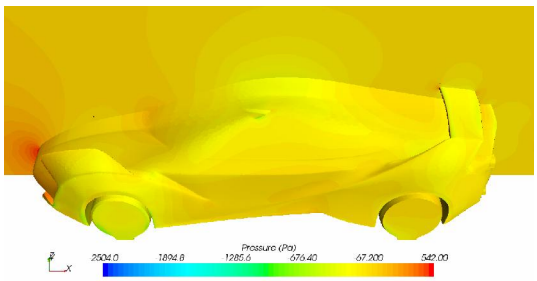

图 5 优化前

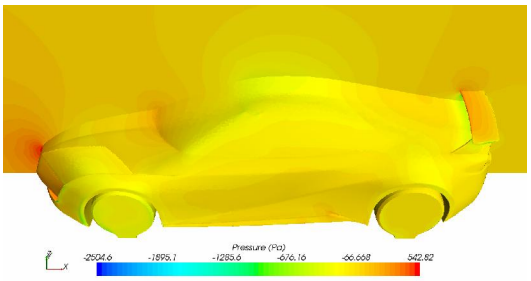

图 6 优化后

从整车外表面和对称面的压力云图中，可以明显看出，优化后尾翼上部压力升高，有利于降低升力系数和风阻系数。表明尾翼线条和剖面优化效果显著。

3.2 车身湍流动能分析：

车身外表面的湍流动能图如图 7 和图 8 所示：

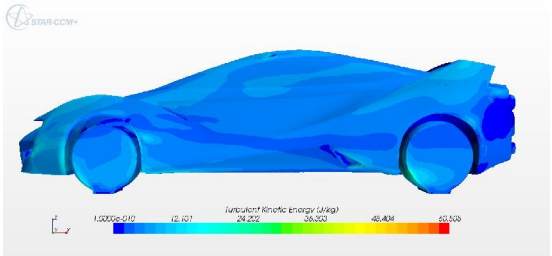

图 7 优化前

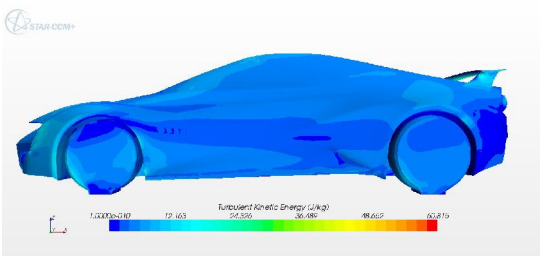

图 8 优化后

图 7 和 8 表示车身表面湍流动能，优化后与优化前相比，侧围低能区域明显扩大，表明车身侧围的优化效果显著，有利于降低风阻系数。

3.3 尾部湍流动能分析

尾部湍流动能图如图 9 和图 10 所示：

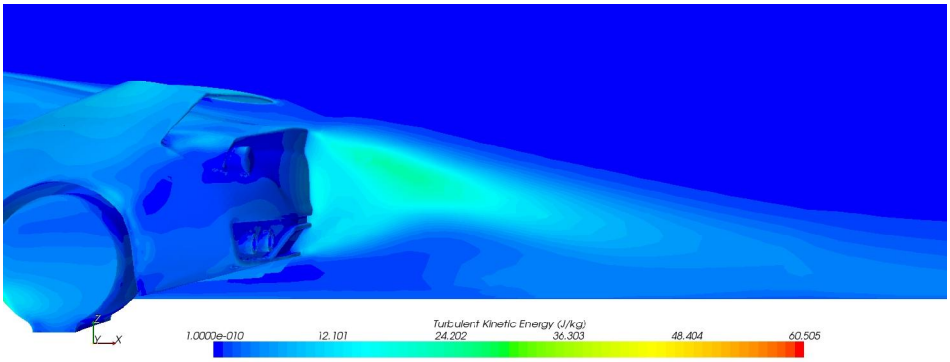

图 9 优化前

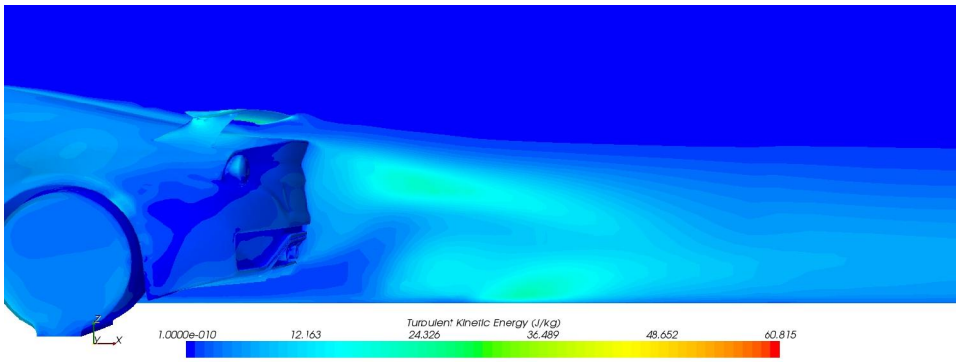

图 10 优化后

图 9 和 10 是车身尾部和纵向对称面的湍流动能图，优化后，尾部涡流发生变化，紧靠车尾湍流动能明显减小，有利于减小气动阻力，减少尘土卷起。表明尾部造型优化（尾部拐角平滑化、扩散器和排气管位置更改）显著。

3.4 风阻系数结果分析：

由于计算域较大，侧壁对车身周围流场影响不大，侧向力接近于零，忽略侧向力系数。[4]

优化前后整车及各部位风阻系数如表 1，通过该表可以看出

（1）优化效果显著的部位有尾翼，格栅，车身；

（2）其中尾翼优化效果最好，使风阻系数降低了 0.0164；而前翼优化后却使风阻系数升高了 0.0048，是优化反差最大的。

（3）和前述图谱分析比较，还可看出图谱与表格数据分析结果基本一致，都是尾翼与车身优化效果显著，而格栅风阻系数的降低主要是由于两侧小格栅面积的减少。这进一步证

明了我们分析的可靠性。

表 1 风阻系数

Part	优化前	优化后	变化值
前翼	-0.0098	-0.0050	0.0048
扩散器板	0.0093	0.0095	0.0003
外后视镜	0.0001	0.0001	-0.0001
尾灯	0.0026	0.0024	-0.0002
排气管	0.0012	0.0009	-0.0003
扩散器	0.0020	0.0015	-0.0006
后板	0.0104	0.0097	-0.0007
进气口	0.0019	0.0003	-0.0016
扩散器后板	0.0094	0.0078	-0.0017
车轮	0.0702	0.0654	-0.0048
车身	0.1629	0.1537	-0.0092
格栅	0.0664	0.0565	-0.0099
尾翼	0.0082	-0.0082	-0.0164
Total:	0.3347	0.2945	-0.0402

4 结论

（1）尾翼和车身侧围的造型对气动阻力有很大影响，需要在设计分析时着重考虑。

（2）利用 CFD 技术，能够在汽车设计的初期阶段对不同的设计方案进行比较分析，预测性能，从中选出最优的方案进行部件布置，避免开发后期出现难以解决的问题，从而加快开发速度，减少实车试验次数和费用[3]。基于空气动力学数值模拟进行汽车气动外形设计是一种快速、简便、有效的设计方法[5]。

5 参考文献

[1] 傅立敏 .汽车空气动力学 [M].机械工业出版社 .北京： 1988.

[2] CDAJ. User Guide of Computational Fluid Dynamic Software STAR-CCM+ version 5.06, 2011.

[3] 陈皓 .乘用车外流场及发动机舱内流动分析，2010年 CDAJ-China中国用户论文集，2010.

[4] 张英朝 .不同尾翼两厢轿车的气动特性数值模拟 [J].吉林大学学报（工学版），2011,41（1） .

[5] 张英朝，张喆，李杰 .基于空气动力学数值模拟的汽车造型设计 [J].吉林大学学报（工学版）， 2009,39（增刊 2）： 260-263.