

基于 STAR-CCM+的 FSAE赛车空气动力学数值仿真研究

The Numerical Simulation Research of FSAE Racing Car Aerodynamic Character Based on STAR-CCM+

张英朝 赵婧 邵书鑫

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+软件对吉林大学 FSAE赛车进行了赛车外流场空气动力学特性研究，设置了多种模拟工况，分析对比了不同边界条件下赛车外流场数值仿真结果，总结归纳了赛车车轮旋转条件对赛车外流场和气动特性的影响。仿真结果表明，赛车的车轮与定风翼周围的气流之间存在相互的作用和干扰，在对赛车进行数值仿真时设定车轮旋转可以更准确的模拟赛车车轮和定风翼之间气流相互作用的现象。在进行赛车的外流场数值仿真时对车轮旋转进行模拟是十分必要的，由仿真结果推断，在赛车风洞试验中车轮是否旋转对试验结果有一定影响，在实际试验中应对此情况加以考虑。

关键词：赛车外流场 ,FSAE 数值仿真 ,STAR-CCM+

Abstract: In this paper, the numerical simulation analysis of Jilin University FSAE racing car aerodynamic character based on STAR-CCM+ was introduced. Several simulated situations had been set and the results of the situations were compared. The effect of the wheel rotating situation of the racing car out flow and aerodynamic character was concluded. It was found that the air flows surrounding the wheels and the wings of the racing influenced each other. When the rotating wheel situation was set during the simulation, the effect that the air flows influenced could be simulated more clearly and the result could be more calculatedly. It was necessary to set the wheel rotate when to simulate the racing car aerodynamic character. From the simulated results, it also could be seen that it was also necessary to take care

of the wheel rotate when to do the racing car wind tunnel test.

Key Word: Racing Car Out Flow, FSAE, Numerical Simulation, STAR-CCM+

1 前言

空气动力特性是汽车的重要性能,它与汽车的操纵稳定性、安全性、动力性和燃油经济性、舒适性等使用性能密切相关^[1]。空气动力特性对车辆整体性能的影响在赛车上体现尤为明显,对于车轮完全暴露的方程式赛车,其车轮阻力占赛车总阻力的比例有时可以达到 45% 以上^[2],在赛车研发过程中研发人员十分注重对赛车空气动力特性的研究与优化,空气动力学套件已成为赛车重要的组成部分。

FSAE 赛车属于方程式赛车,车轮完全暴露在空气中,在前轮前方和后轮上方往往布置定风翼来获得赛车高速行驶时所需要的下压力^[3]。车轮和定风翼之间距离较小,分布在车轮和定风翼周围的气流会相互作用,他们之间的这种相互作用会影响整个赛车的外流场分布。

对赛车空气动力特性进行研究可使用数值仿真、风洞试验和理论研究相结合的方法^[4]。目前对赛车外流场进行风洞试验和数值仿真的技术已比较成熟,但是很多汽车风洞在进行赛车风洞试验时往往难以实现车轮的旋转,传统测量方法也很难对旋转车轮采集可靠的数据。车轮旋转会使车轮周围的气流发生很大改变,车轮旋转与否是进行赛车风洞试验和数值仿真时一个质的区别^[5]。本文使用 STAR-CCM+ 软件对吉林大学 FSAE 赛车的气动特性进行了分析,比较了不同模拟条件下赛车外流场仿真结果,总结了赛车车轮旋转对赛车外流场和赛车气动特性的影响。

2 数值仿真方法简述

传统上对于汽车相关流场问题的研究大多采用试验方法,这种方法获得的结果可靠且具有指导意义,但是研究时间长,费用花费大。近年来,计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)技术蓬勃发展,广泛应用于解决汽车流场问题^[6]。计算流体动力学(CFD)是一门独立学科,建立在经典流体动力学和数值仿真计算方法基础之上,它使用数值计算的方法,对包含有流体流动和热传导等相关物理现象的系统进行分析,利用图像显示等手段对结果进行展示^[6]。

2.1 计算模型

本文使用 STAR-CCM+ 软件对吉林大学 FSAE 赛车进行外流场数值仿真模拟。本文按照实际情况建立 1:1 赛车 CAD 模型，包含赛车内外表面、前后翼、车架、发动机、座椅、防滚架等结构。本文采用大计算域方法，具体设定为：在 X 方向上，车头与入口处距离 4 倍车长，车尾与出口处距离 8 倍车长；在 Y 方向上，赛车中心对称面与计算域左右壁面距离为 4.5 倍车宽；在 Z 方向上，赛车顶部与计算域顶面距离 5 倍车高。

本文使用 STAR-CCM+ 软件生成网格并进行计算。STAR-CCM+ 软件提供的包面功能 (Wrap) 能够大大减轻在进行模型表面处理时的工作量，图 2.1 为表面特征复杂的赛车发动机 CAD 模型经包面处理后的网格分布，可以看到包面后发动机的典型几何特征保留完整。

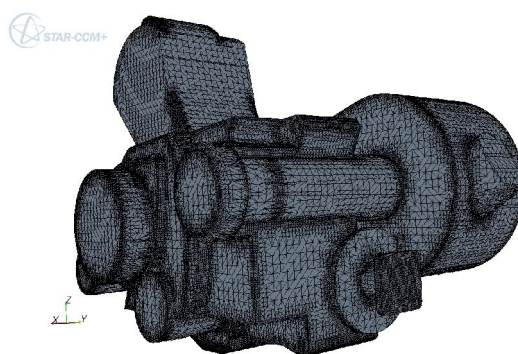


图 2.1 发动机包面效果图

作者使用了 Trim 形式的网格对外流场区域和车身表面进行网格划分，使用了 Prism 形式的网格模拟车身表面和地面的边界层，在作者比较关心的流场区域如前后翼、车身尾部等部位进行了网格加密处理。STAR-CCM+ 的 Trim 网格具有结构化网格计算稳定易于收敛的特点，又同时兼具非结构化网格适应性良好的特点，非常适合进行车身外流场这一类型的网格数目较多的流体仿真。图 2.2 为体网格分布图。

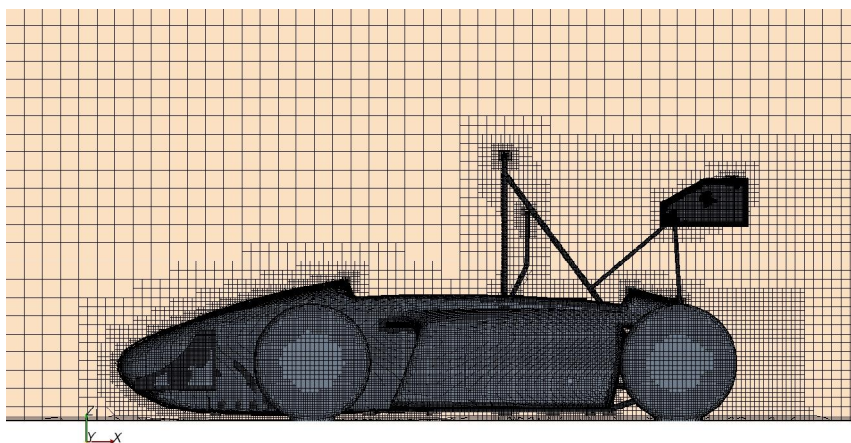


图 2.2 体网格布置图

2.2 计算条件的设定

本文分析四种工况,通过对比四种工况的仿真结果寻找赛车外流场数值仿真合适的边界条件设定,探究车轮旋转对仿真结果的影响。表 2.1 为本文设定的四种工况。

表 2.1 计算工况设定列表

工况	边界条件
1	速度入口(inlet),压力出口(outlet),地面无滑移(no slip),车轮无旋转(no rotating)
2	速度入口 (inlet) , 压力出口(outlet), 滑移地面(slip), 车轮无旋转(no rotating)
3	速度入口 (inlet) , 压力出口(outlet), 无滑移地面(no slip), 车轮旋转(rotating)
4	速度入口 (inlet) , 压力出口(outlet), 滑移地面(slip), 车轮旋转(rotating)

3 仿真结果分析

使用 STAR-CCM+软件计算得到吉林大学 FSAE 赛车总阻力系数为 1.222, 与现代汽车 0.3 左右的阻力系数值相比, 这个值明显偏大, 这个较高的阻力系数值是由 FSAE 赛车特定的结构决定的。图 3.1 为吉林大学 FSAE 赛车的结构布置图, 赛车的车身表面造型平顺, 具有较好的流线型特征, 赛车的车轮、定风翼和座椅等部件完全暴露在空气中, 这些暴露在外部件会产生较大的气动阻力。

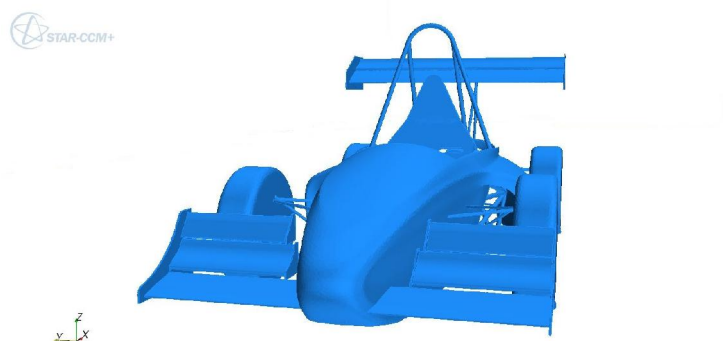


图 3.1 吉林大学 FSAE 赛车结构布置图

图 3.2 为吉林大学 FSAE 赛车各部件阻力系数占赛车总阻力系数的百分比示意图。

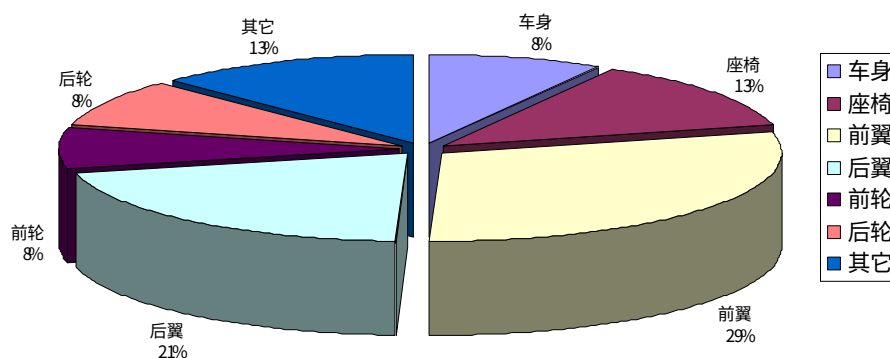


图 3.2 赛车各个部件阻力系数所占整车阻力系数的比重

图 3.2 显示了吉林大学 FSAE 赛车各个部件阻力系数所占整车阻力系数的比重，前后翼阻力系数所占比重最大，基本上占据了赛车总阻力系数的 50%左右，其次就是赛车暴露在外的座椅和前后轮，它们大概占据了赛车总阻力的 30%。由此可见，在进行赛车外流场的数值仿真和风洞试验时，能否准确模拟赛车定风翼和车轮周围的流场分布是决定能否准确获得赛车气动力特性的关键因素。

图 3.3 为四种工况下赛车外流场的速度分布图。

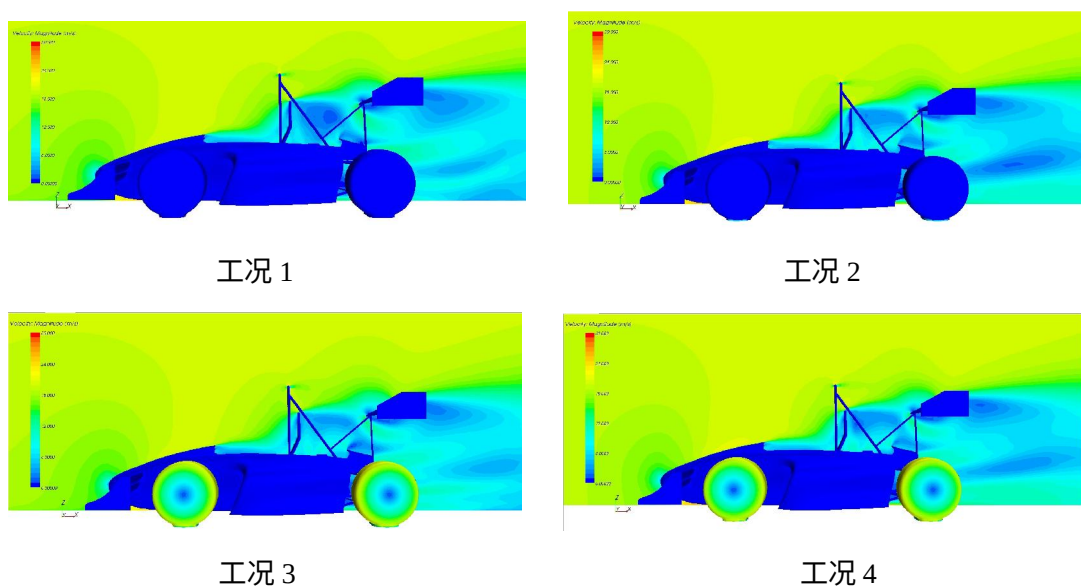


图 3.3 四种工况下赛车外流场速度分布图

比较在四种工况条件下赛车外流场的速度分布，在赛车车身前部和赛车尾部的气流流速有明显差异，产生差异的根本原因在于设置了旋转车轮这一条件以后分布在车轮与定风翼周围的气流特性发生了改变。

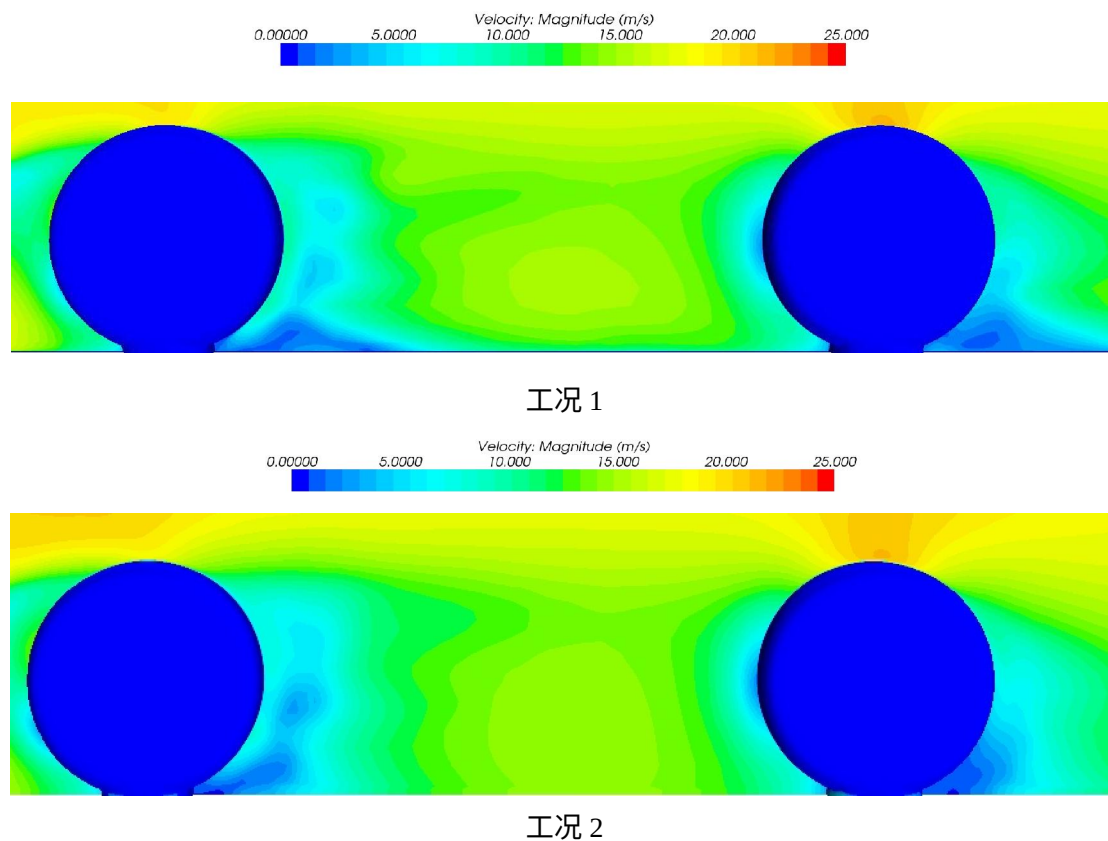
表 3.1 为四种工况下赛车各组件的气动力系数值。

表 3.1 四种工况下赛车各组件气动力系数值

	工况 1		工况 2		工况 3		工况 4	
组件	Cd	Cl	Cd	Cl	Cd	Cl	Cd	Cl
车身	0.106	-0.161	0.111	-0.167	0.101	-0.187	0.110	-0.204
座椅	0.149	-0.068	0.151	-0.072	0.150	-0.087	0.149	-0.091
前翼	0.352	-0.667	0.387	-0.705	0.347	-0.793	0.382	-0.888
后翼	0.230	-0.437	0.228	-0.443	0.250	-0.608	0.228	-0.624
前轮	0.088	0.048	0.090	0.061	0.089	0.068	0.097	0.088
后轮	0.104	0.057	0.106	0.063	0.101	0.067	0.110	0.083
其它	0.151	0.028	0.145	0.025	0.140	0.029	0.146	0.029
和值	1.180	-1.200	1.218	-1.238	1.178	-1.511	1.222	-1.607

比较表 3.1 中数值, 在设置仿真条件时车轮旋转与否对赛车总气动力系数值存在一定影响, 设置移动地面以后, 阻力系数增大, 升力系数减小。

图 3.4 为四种工况下车轮周围气流的速度分布图。



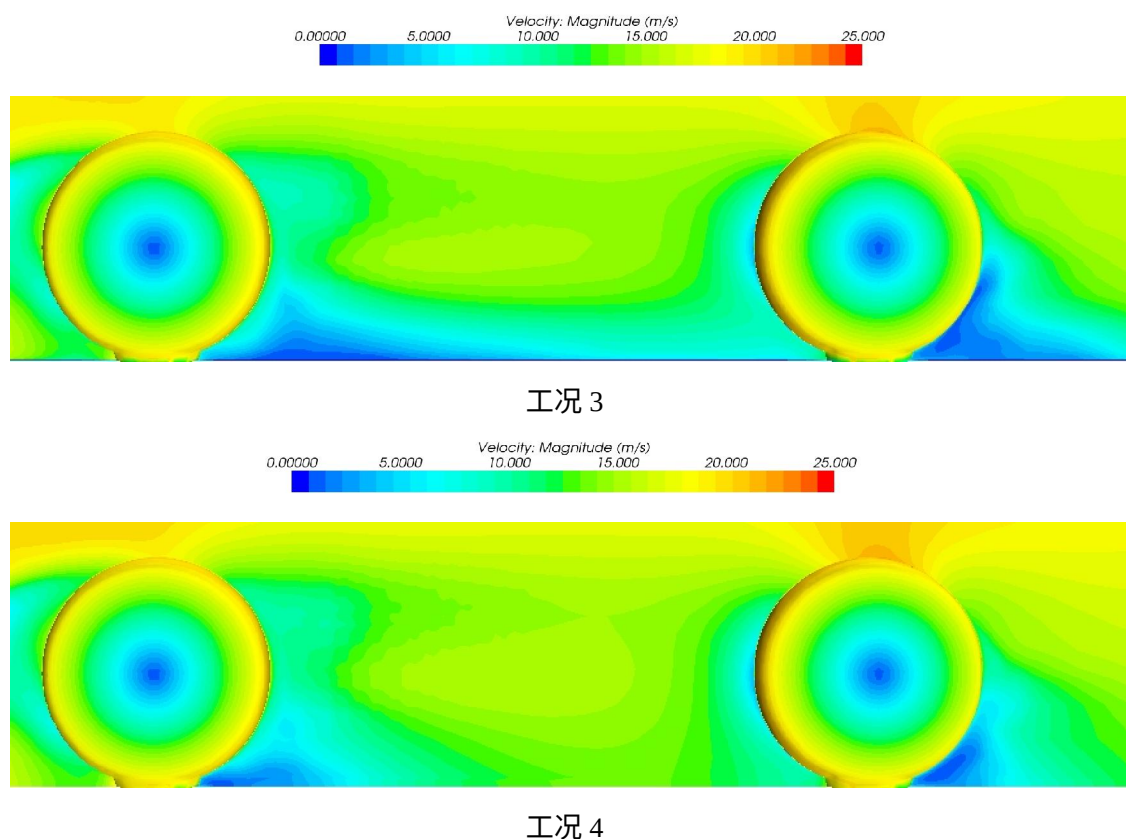


图 3.4 车轮周围气流速度分布图

是否设置车轮旋转对车轮周围流场的速度分布影响很大。比较图 3.4 中工况 1 和工况 3，受到车轮旋转的影响，车轮后部气流速度增加，车轮后部的低速区面积减小。结合表 3.1 中工况 1、3 的数据分析发现，后轮周围流场对车轮旋转条件更加敏感。

同时设置车轮旋转的第 3、4 工况中，前后轮流场出现较大差异的地方均为车轮后部靠近地面附近的区域，这是因为气流流经固定地面时产生的边界层与车轮后方涡旋相互作用而导致的。工况 4 中地面设置为移动地面，更真实的模拟了赛车实际行驶时车轮与地面的相对运动状态，由此可见，工况 4 的边界条件设置更适合对赛车进行外流场模拟。

表 3.1 中数据显示，当车轮的边界条件设置不同时，前后翼的气动力系数值变化最为剧烈，导致前后翼气动力系数变化的原因是车轮周围气流与前后翼周围气流的相互作用。

图 3.5 是工况 1 和工况 3 中前翼和前轮周围流场的压力分布图。

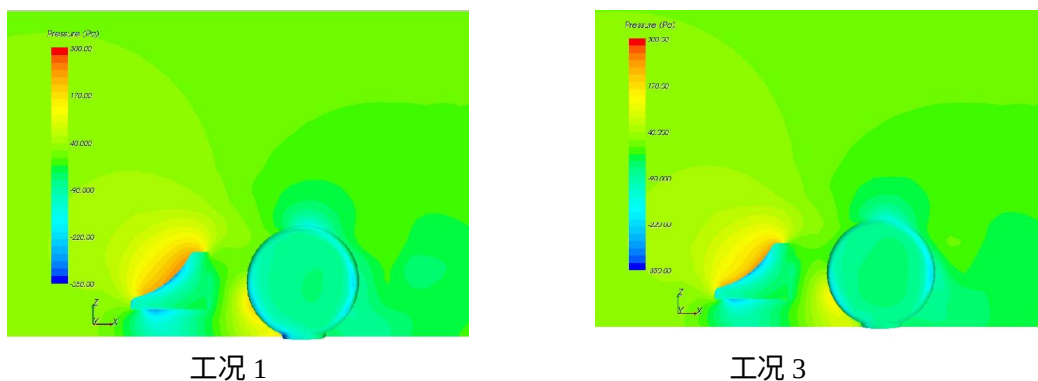


图 3.5 前翼、前轮周围流场压力分布图

图 3.6 是工况 1 和工况 3 中后翼和后轮周围流场的压力分布图。

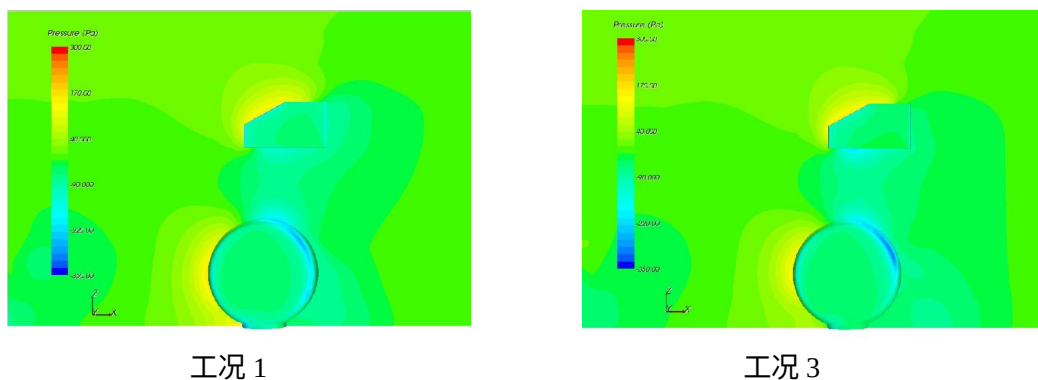


图 3.6 后翼、后轮周围流场压力分布图

由图 3.5，设置车轮旋转条件以后前翼前方的正压区压力降低，前翼前后表面压力差减小，前翼阻力系数减小，由图 3.5 还可知前翼下部负压区面积增大，前翼上下表面压力差增加，负升力系数降低。分析图 3.6，设置车轮旋转条件以后翼前方的正压区压力增加，后翼前后表面压力差增大，后翼阻力系数增大，同时后翼上下表面压力差显著增加，后翼负升力系数降低。

4 结论

通过本文研究，可得以下结论：

(1) FSAE赛车受到其特殊结构的制约，分布在前后翼与车轮周围的气流相互影响，旋转的车轮对赛车车身表面气流分布状态影响很大。

(2) 在对赛车外流场进行数值仿真时，是否设置车轮旋转条件影响赛车前后翼及其他部件的气动力特性仿真结果，与将车轮简化为静止刚体的情况相比，设置旋转车轮所得的仿真结果阻力系数和升力系数都偏小，前后翼的气动特性在两种条件下差异很大，由此可见在进行赛车外流场数值仿真时设置车轮旋转条件是十分必要的。

(3) 在进行赛车风洞试验时要考虑车轮的旋转, 在条件允许时不应把车轮简化为静止情况, 若条件受限不能模拟车轮的旋转状态, 则应对试验数据进行修正, 以获得更准确的试验结果。

5 参考文献

- [1]傅立敏. 汽车空气动力学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998
- [2]William F Milliken, Douglas L Milliken. Race Car Vehicle Dynamics [M]. USA Warrendale: SAE international, 1995.
- [3]Joseph Katz. Race Car Aerodynamics Designing for Speed [M]. USA Cambrige: Bentley Publishers, 1995.
- [4]Scott Wordley, Jeff Saunders. Aerodynamics for Formula SAE: Initial Design and Performance Prediction[C]//SAE paper 2006-01-0806.
- [5] Zhang Yingchao, Li Jie, Zhang Zhe. Numerical Study on Aerodynamic Characteristics of Isolated Wheel[C]//Proceedings of the 3rd ICMEM International Conference on Mechanical Engineering and Mechanics, 2009.
- [6]王福军. 计算流体动力学分析 [M] 北京: 清华大学出版社, 2004.