

# 面向FSAE赛车的空气动力学套件设计与仿真

王广福<sup>1,2</sup>, 刘嘉琪<sup>1,3</sup>, 盛选禹<sup>1,3\*</sup>, 孔文文<sup>1</sup>

<sup>1</sup>季华实验室, 广东 佛山

<sup>2</sup>中国煤炭科学研究院矿山人工智能研究所, 北京

<sup>3</sup>清华大学机械工程系, 北京

收稿日期: 2026年2月18日; 录用日期: 2026年3月11日; 发布日期: 2026年3月17日

## 摘要

本文围绕大学生方程式赛车(FSAE)的高性能空气动力学套件开发, 开展从目标设定、部件设计到仿真验证的全流程研究。基于大学生方程式赛事多弯、低速的赛道特点, 论文确立了以高负升力、高升阻比及平衡的前后轴气动分配为核心的设计目标。据此, 提出了一套流场整合思路下的前翼、尾翼和底板扩散器等气动套件设计方案。通过STAR CCM+软件进行CFD数值仿真, 结果表明: 该套件在80 km/h风速下负升力1506.1N,  $C_L/A$ 达到-5.25, 升阻比为3.05, 前后气动分配接近50%: 50%, 基本实现了设计目标, 并能通过调节襟翼攻角和前翼离地间隙灵活调整气动分配。流场分析一方面验证了本设计的可行性, 另一方面也揭示了轮边射流、扩散器后段分离等待优化的问题, 为此提出了降低扩散角、引导前翼气流内洗等具体改进建议, 为FSAE赛车的空气动力学设计提供了有价值的理论参考与实践案例。

## 关键词

大学生方程式赛车, 空气动力学, 有限元仿真, CFD

# Design and Simulation of an Aerodynamic Kit for FSAE Racing Cars

Guangfu Wang<sup>1,2</sup>, Jiaqi Liu<sup>1,3</sup>, Xuanyu Sheng<sup>1,3\*</sup>, Wenwen Kong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ji Hua Laboratory, Foshan Guangdong

<sup>2</sup>Research Institute of Mine Artificial Intelligence, Chinese Institute of Coal Science, Beijing

<sup>3</sup>Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing

Received: February 18, 2026; accepted: March 11, 2026; published: March 17, 2026

\*通讯作者。

文章引用: 王广福, 刘嘉琪, 盛选禹, 孔文文. 面向 FSAE 赛车的空气动力学套件设计与仿真[J]. 建模与仿真, 2026, 15(3): 31-45. DOI: 10.12677/mos.2026.153041

## Abstract

We present a comprehensive study on the development of a high-performance aerodynamic kit for Formula Student racing cars (FSAE), covering the entire process from goal setting and component design to simulation validation. Considering the multi-curve, low-speed characteristics of Formula Student racing tracks, the paper establishes core design objectives centered on high down-force, high lift-to-drag ratio, and balanced front-to-rear aerodynamic distribution. Based on these objectives, an integrated flow field approach is adopted to propose aerodynamic kit designs for the front wing, rear wing, and under-body diffuser. CFD simulations conducted using STAR CCM+ software demonstrated that at an 80 km/h wind speed, the kit achieved a  $C_L \cdot A$  of 5.25 and a drag-to-lift ratio of 3.05, with front-to-rear aerodynamic distribution approaching 50%:50%. This largely fulfilled the design objectives, while allowing flexible adjustment of aerodynamic distribution through flap angle and front wing ground clearance. The flow field analysis not only demonstrated the design's feasibility but also revealed optimization challenges such as wheel-edge jets and separation in the rear section of the diffuser. Specific improvement suggestions were proposed, including reducing the diffusion angle and guiding the front wing airflow inward. This provides valuable theoretical reference and practical case studies for aerodynamic design in FSAE racing cars.

## Keywords

FSAE, Aerodynamics, Finite Element Simulation, CFD

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 前言

大学生方程式赛车(FSAE)(图 1)由国际汽车工程师学会(SAE International)于 1978 年发起,旨在模拟一家小型的汽车制造工厂,要求大学生团队在规定时间内,设计并制造出一辆小型方程式赛车,并参加静态和动态的比赛。历经数十年的发展,至今在全球已有 24 个国家和地区举办大学生方程式系列赛事,参赛队伍超过 800 支。中国大学生方程式系列赛事起源于 2010 年,并在 2024 年正式纳入全球排名系统,标志着中国大学生方程式赛事进入国际化的新阶段。

在包括 FSAE 赛车在内的几乎所有赛车设计中,空气动力学是至关重要的环节,甚至在一些高级别赛事中,空气动力学性能逐渐成为左右赛车竞争力的第一因素。赛车多在高速的极限工况下工作,空气阻力和负升力对于赛车的动力性、操控性、经济性等因素产生巨大影响[1]。良好的负升力能够在有效增加轮胎的垂向载荷的同时极少地增加整车质量,从而大幅度增加赛车的弯道性能。而较低的阻力能够提升赛车的加速和极速水平。

FSAE 赛车设计基于大学生方程式系列赛事颁布的赛事规则打造,作为一类方程式汽车竞赛,赛规规定了 FSAE 赛车的轴距、轮距、动力系统、外观等各类参数,同时也对赛车空气动力学套件设计做出了严格的限制。在规则的框架下设计出性能更高、与整车设计更为适配的空气动力学套件是这项比赛对学生提出的要求。本文基于 2025 年中国大学生方程式汽车大赛规则,使用三维建模软件进行整车空气动力学套件的设计,使用 CFD 仿真软件 STARCCM+对所设计的空气动力学套件进行仿真,并分析仿真结果提出优化方法与建议。本文旨在提出一套适用于 FSAE 赛车的高负升力、低阻力、气动分配平衡的空气

动力学套件, 通过使用有限元软件进行仿真分析, 为包括 FSAE 在内的开轮式赛车气动部件的设计和 optimization 提供理论指导, 推动赛事空气动力学设计水平提升。

## 2. 赛车空气动力学套件设计

FSAE 赛车的空气动力学套件主要由前翼、底板扩散器、尾翼三部分组成, 同时车身、车手和车轮对于赛车空气动力学性能影响巨大, 通常也纳入建模和仿真。模型如图 1 所示。

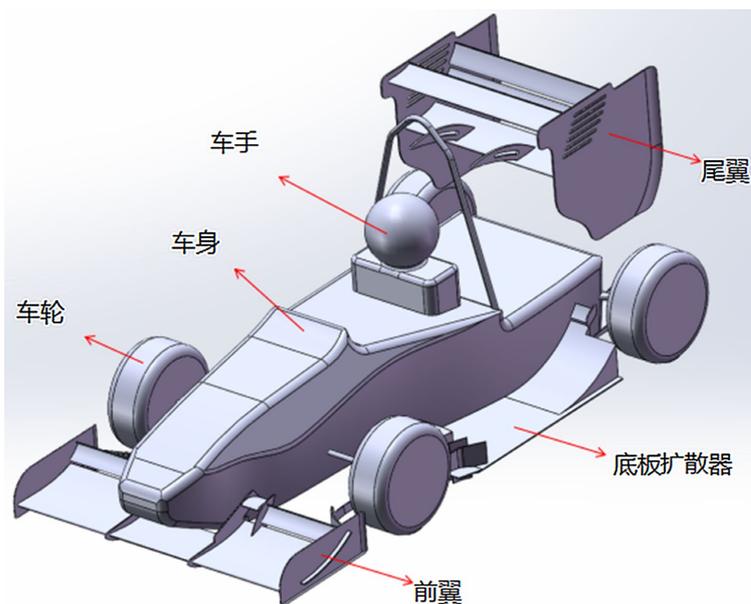


Figure 1. Schematic diagram of the FSAE race car aerodynamic model  
图 1. FSAE 赛车空气动力学模型示意图

空气动力学套件的设计应该以服务整车性能为首要目标, 因此在设计之前需要分析 FSAE 赛车和大学生方程式赛事特点, 并给出有针对性的设计目标。

### 2.1. 设计目标

根据 2025 中国大学生方程式汽车大赛规则[2], FSAE 赛车在动态赛中需要进行直线加速、八字绕环、高速避障和耐久测试四个项目。其中, 直线加速赛道长度 75 m、宽度约 3 m; 八字绕环赛道(图 2)由两个同心圆呈八字形排列, 两个圆心之间距离为 18.25 m。内圆直径为  $\Phi 15.25$  m, 外圆直径为  $\Phi 21.25$  m; 高速避障测试和耐久测试赛道相似, 设计的平均时速为 48 km/h 到 57 km/h 之间, 设计最高速度约 105 km/h。

根据动态赛的赛道规则可以发现, 大学生方程式竞赛的赛道表现出多弯、低速的特征, 这对赛车的操纵性和空气动力学负升力提出了很高的要求。因此, FSAE 赛车整体设计呈现时速较低、轴距短的特征, 同时赛道的多弯道设计导致赛车对低速工况下负升力的需求较高, FSAE 赛车的空气动力学套件相比于其他赛车更加高大, 能够在较低的速度下提供足够的负升力。空气动力学套件将负升力施加在车体, 最终转化为前后轮的垂向力, 前后气动分配对于整车的前后轮载荷影响较大: 如果气动力分配相对整车质心偏向后轴, 则随着速度的提升整车呈现愈发严重的转向不足情况, 反之则会出现愈发严重的转向过度。所以赛车空气动力学套件不仅需要提供充足稳定的负升力, 也要求负升力在前后轴上的合理分配。车辆坐标参考规定如下: 以车头指向为+X 方向, 车身左侧为+Y 方向, 向上为+Z 方向。

在这些前提下, 本文对拟设计的 FSAE 赛车空气动力学套件提出以下设计目标。

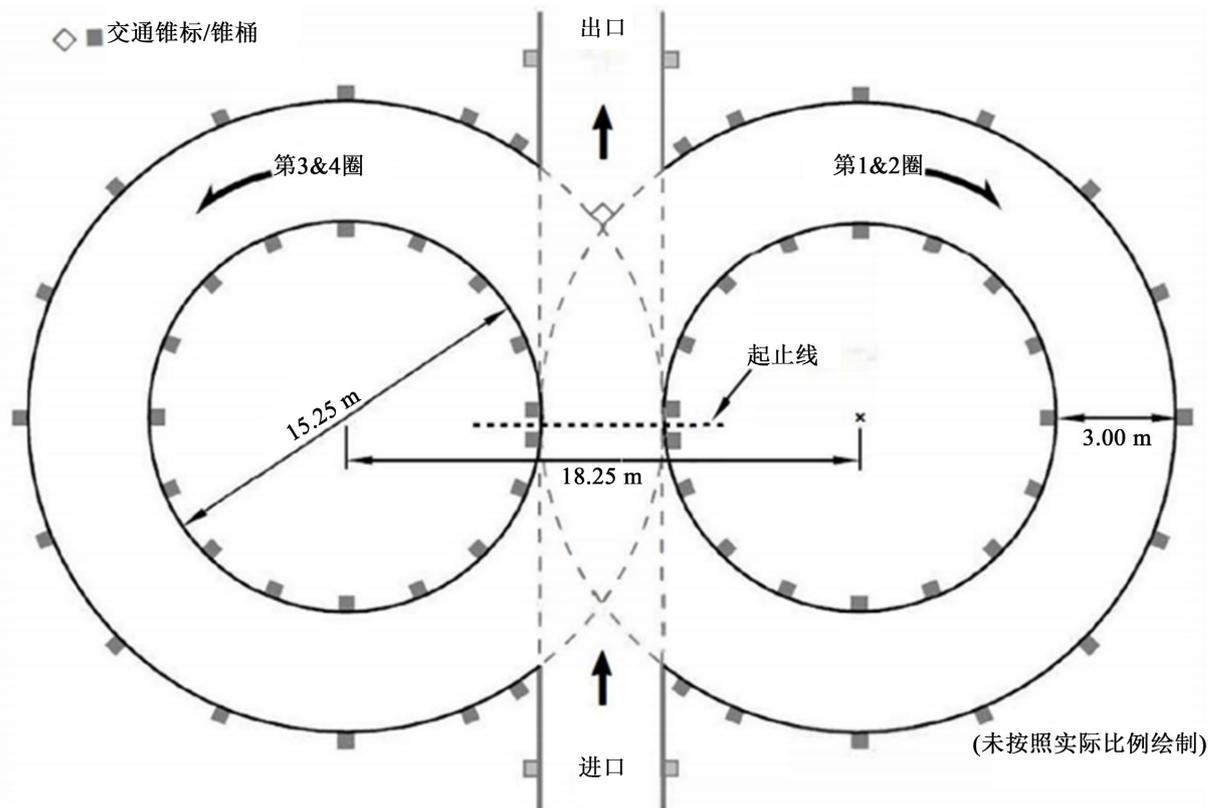


Figure 2. Diagram of the figure-∞ loop race track  
图 2. 8 字绕环赛道示意图

- (1) 具有较高的负升力系数，目标  $C_L \cdot A < -5$ 。
- (2) 气动阻力相对较低，升阻比(即负升力与阻力的绝对值之比) $L/D > 3$ 。
- (3) 前后轴气动载荷约为 50%:50%。
- (4) 提供前后轴气动分配的可调方案，为不同驾驶风格的车手提供充足的调教窗口。
- (5) 由于成本核算和商业盈利也是竞赛的一环，赛车空气动力学套件尽可能选择加工成本较低的方案，如定截面翼片、共用模具等。
- (6) 制造和安装难度较低。

## 2.2. 前翼设计

在 FSAE 赛车中，前翼是整车气流的上游，流经前翼的气流随后经过底板、扩散器和尾翼，因此前翼设计不仅需要考虑到提供充足的负升力，还需要考虑到对于整车流场作用，以整合流场的思想进行设计(图 3)。

本文所设计的前翼采用双主翼设计，在近地面翼片组整体弯度提高的同时有效避免气流失速，主翼翼型为 S1210，该翼型具有较高的弯度，在低速工况下负升力表现良好，襟翼使用 CH10 翼型。双主翼设计中，第一主翼使用负攻角加强下翼面进气和前翼压缩比，在获取较高负升力的同时可以适当降低第二主翼的攻角以避免底板前侧气流过度上洗。轮前翼片组使用大攻角双襟翼，使气流有效抬升至前轮以上，减少前轮对前翼气流的影响。主翼上方布置外洗旗翼，配合从轮前向鼻锥递减的一二级襟翼和升力翼端板产生外洗涡，将轮胎乱流引导到车身外侧；主翼下方布置内洗列板，将气流导流到底板并提前引导轮

前气流内洗，减少轮胎射流强度。端板也采用外洗的襟翼后缘设计以提高翼尖涡的强度，同时端板外侧布置导流条，产生的涡从外侧绕过轮胎，同样对轮胎乱流起到引导作用；将传统的前翼端板保压条换成 Y 向翼型，通过利用 Y 方向端板下端内洗增加负升力。前翼整体通过安装吊耳孔位设计了三档离地高度调节，改变前翼离地间隙用于调节前翼负升力，提供较大的前后气动力分配调节空间。

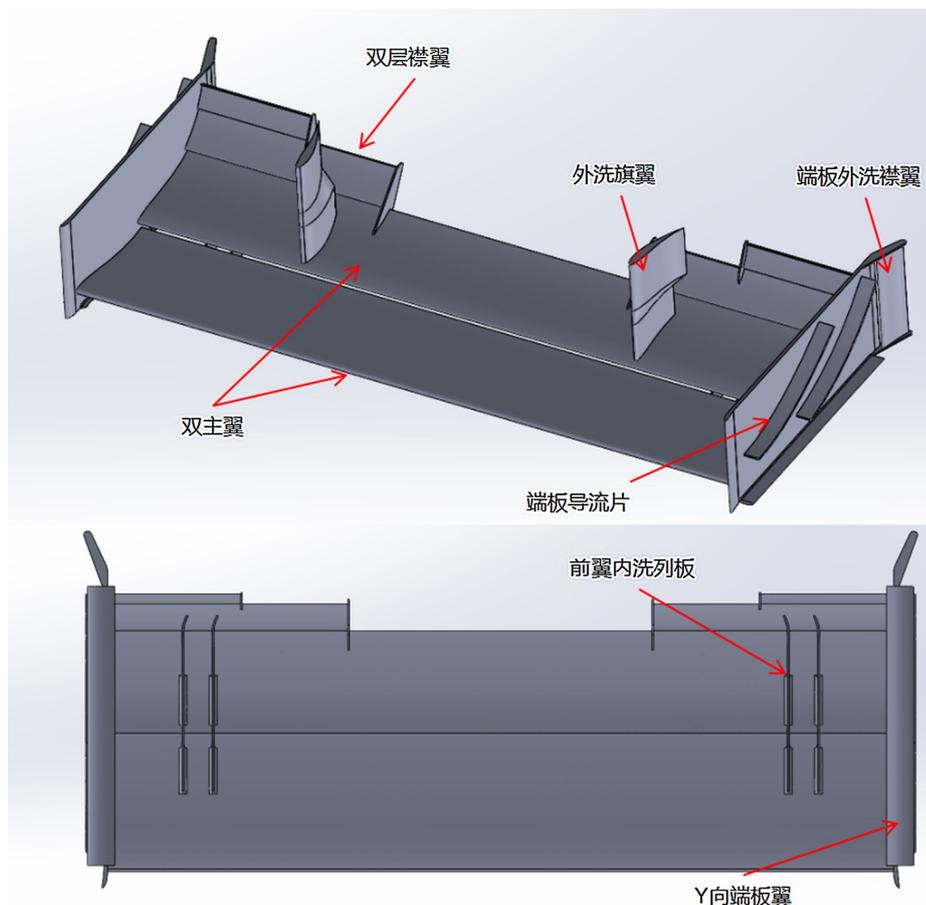


Figure 3. Front wing model  
图 3. 前翼模型

### 2.3. 尾翼设计

尾翼位于整车流场的下游，受到前翼、扩散器上洗气流和车身、车手产生的低能气流的影响，在设计过程中需要考虑合理利用车体两侧的高能气流以及避开乱流区域。作为整车负升力三大来源之一，尾翼对于整车的负升力水平和气动分配平衡至关重要。一方面规则为尾翼的设计留出了充足的空间，另一方面，大展长的前翼与地面形成文丘里通道大幅度增加了前翼的负升力，这就要求远离地面的尾翼用更大的弦长和攻角提供与前翼相当的负升力，防止气动分配过于偏向前轴。

在翼型选型方面，由于不再有小离地间隙下大弯度翼型失速的风险，本文选择了由 Sriram 提出的 MSHD 翼型[3]作为尾翼的主翼(图 4 和图 5)。该翼型攻角在  $2^\circ$  以上时升力系数明显高于赛事常见的 S1223 翼型，且负升力峰值在攻角  $20^\circ$  左右出现，表明其对于正攻角来流角度具有很强的适应性和极高的性能。

尾翼整体采用主组合翼加上梁翼设计，主组合翼带有两片襟翼，上梁翼带有一片襟翼，襟翼采用 CH10 翼型。主组合翼主翼采用变截面设计，翼片中部攻角较小，在后缘位置不变的情况下可以抬高前缘，避

开头枕后部的乱流区；两侧攻角较大，承接前翼和扩散器的上洗来流，增加实际攻角到设计值。端板上梁翼襟翼与主翼襟翼均在后方开口泄压，减少阻力；采用翼型百叶窗设计并使用 3D 打印预埋的工艺大幅降低了端板特殊部件的加工装配难度，在泄压降低阻力的同时提供部分负升力。端板两侧也设计了平板保压条，保护尾翼下翼面低压，增大上下压差从而增加负升力。尾翼襟翼采用主组合翼加上梁翼共六档调节，通过调节襟翼攻角大幅度减少阻力，并与前翼挡位配合，扩大前后部负升力调节空间。

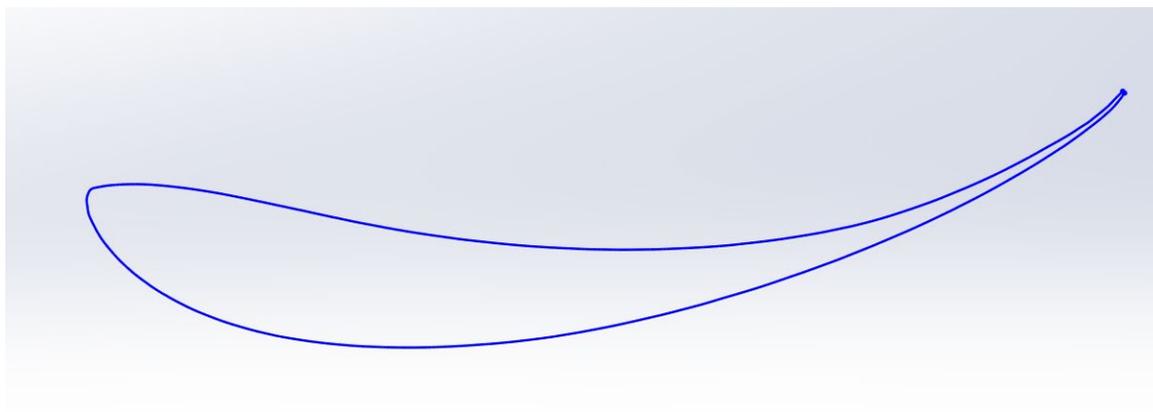


Figure 4. MSHD airfoil  
图 4. MSHD 翼型

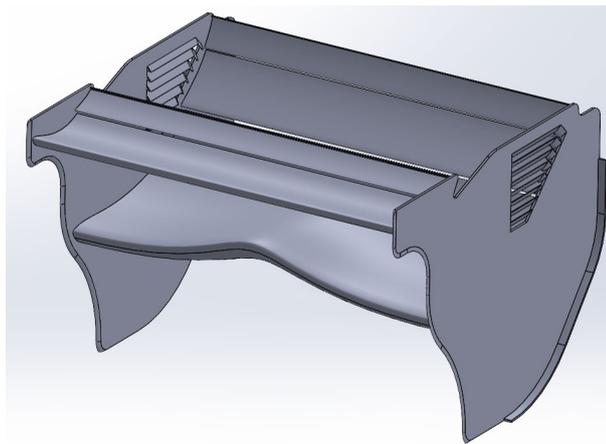


Figure 5. Tail fin model  
图 5. 尾翼模型

## 2.4. 底板及扩散器设计

赛车的扩散器与底板配合，在赛车底部和地面直接形成截面积先收缩后扩张的文丘里通道，利用文丘里效应加速底部气流在车底创造低压区，从而为赛车提供大量负升力，是赛车上最重要的空气动力学部件之一。同时由于底板和扩散器不使用大攻角的组合翼，产生的阻力很小，能够大幅度提升赛车的升阻比，是空气动力学套件中效率最高的部分。

现有 FSAE 赛车的车体结构使得尾部的扩散器布置空间受限，所以设计重心转移到使用后轮之前的侧置扩散器代替尾部扩散器，在车体中部产生低压，通常成为侧扩散器。侧扩散器在结构上可以分为翼片式(图 6)和壳体式两类，翼片式扩散器使用主翼加襟翼多片翼片组合的形式，整体结构与前翼类似，使

用近地面翼片组加速底部气流起到提供负升力的效果；壳体式扩散器使用一整块碳纤维曲面壳体，与车身和底板共同形成一个低压区，利用文丘里效应加速气流。两者在功能和原理上较为相近，但是加工工艺和安装方法区别较大。

为保证钢管车身安装便捷和整体刚度，底板和侧扩散器采用一体成型的壳体式设计(图7)，并不使用翼型侧翼，故将底板和侧扩散器统称底板。作为整车气流的中游，底板需要在前方承接前翼来流，

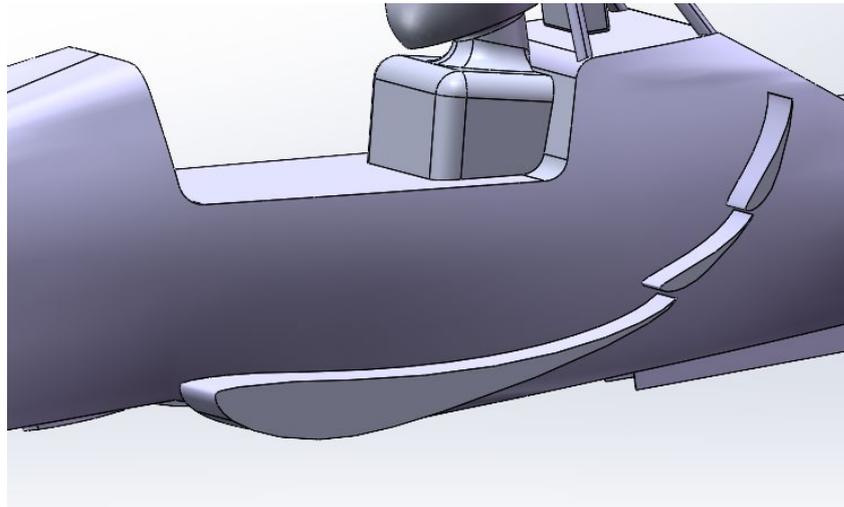


Figure 6. Schematic diagram of the cross-section of a finned side diffuser

图6. 翼片式侧扩散器截面示意图

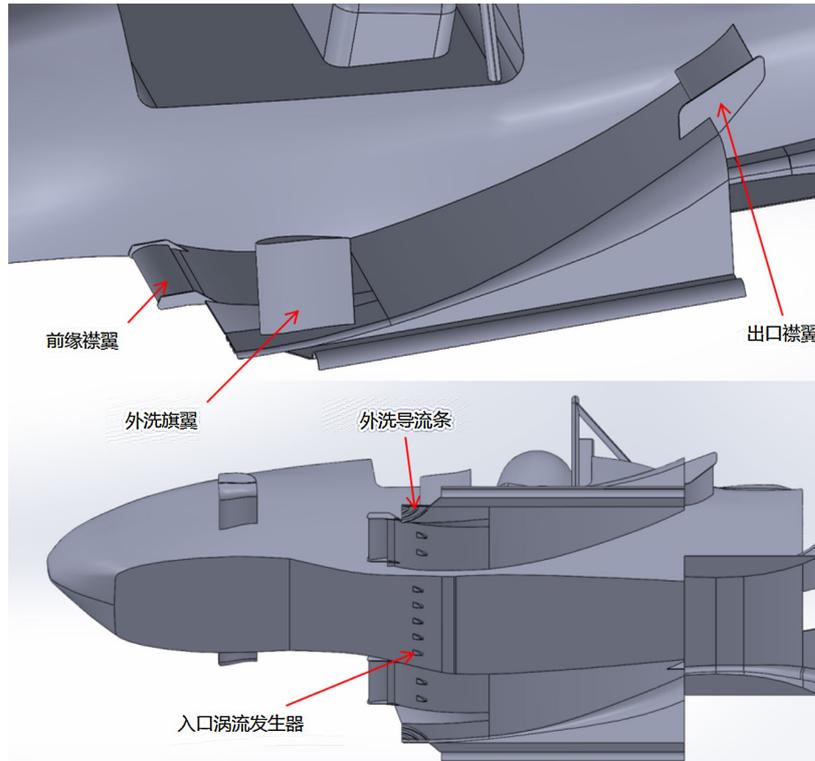


Figure 7. Base plate, body, and diffuser models

图7. 底板、车身及扩散器模型

在后方也需要考虑尾翼的工作效率，故设计过程中除了考虑本体性能还需要针对前后流场进行优化。底板前部设计了翼型前缘和前缘襟翼用于承接上游上洗气流，减少上表面分离，底板入口布置涡流发生器，加强底部气流附着，在扩散器出口加入一片襟翼创造出口负压以增大扩散器的抽吸作用，避免气流与后轮后悬的直接接触。上下表面设有外洗旗翼和导流条，外洗旗翼配合上游的外洗涡进一步将轮胎乱流推离车体以保证后半部分的干净气流，下表面外洗导流条引导轮胎的低能气流向外排出。

### 2.5. 轮边气动部件

对于开轮式赛车而言，轮胎乱流管理对于整车气动效率至关重要。FSAE 赛车具有轴距短、底部负压强的特点，所以轮胎的前侧会产生方向指向内部的射流，在轮胎内侧和后方形成较大的低能气流区域(图 8)，在这些低能区域中，空气动力学套件的性能将大幅度降低。在 FSAE 赛车中，受到轮胎乱流影响最大的是底板及扩散器，因此，设计过程中需要在轮边引入一些引导性的气动部件抑制轮胎乱流或是将乱流推离扩散器入口。

本文所设计的空气动力学套件在前轮和前悬架杆系上加入了一系列翼片组(图 9)，在 XOZ 平面内，这些翼片呈现升力翼的特征，引导前翼的上洗气流向内偏转，并在下方产生高压以抑制轮胎乱流，

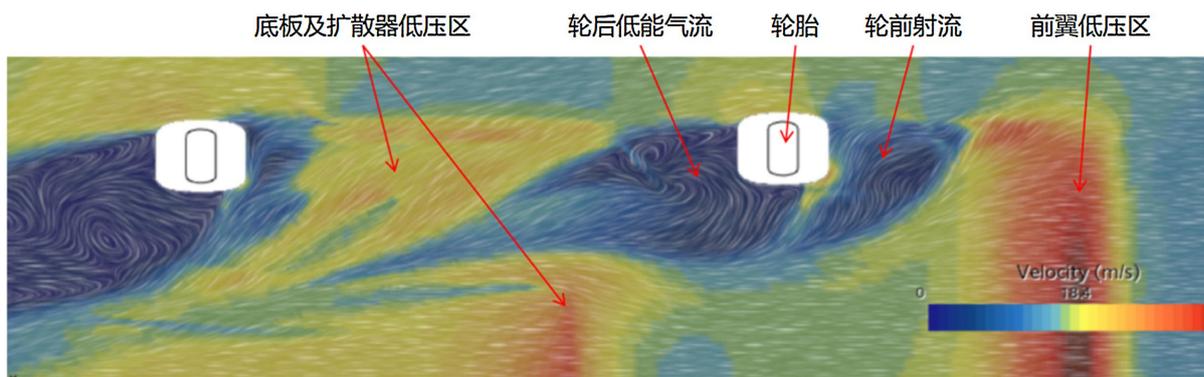


Figure 8. Near-ground tire turbulence distribution

图 8. 近地面轮胎乱流分布

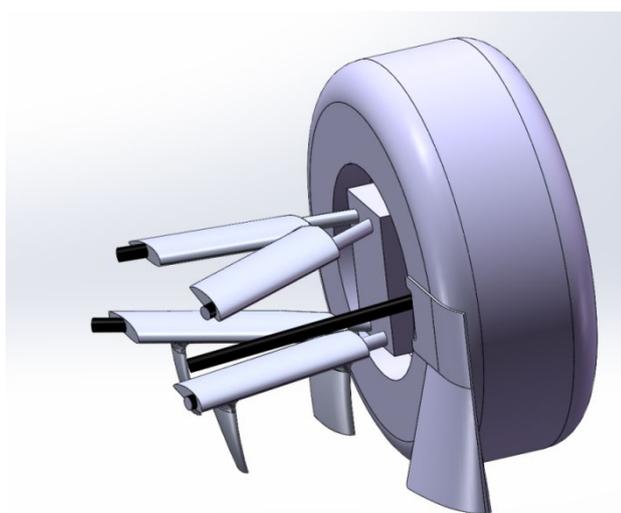


Figure 9. Wheel-mounted fin assembly model

图 9. 轮边翼片组模型

将其推离车体。在 XOY 平面内，由下叉臂翼片组下方延伸出一组垂直的外洗翼片，将轮胎乱流向外推出。在立柱上通过支架加装了一个在转向时可以随着轮胎一起转动的翼片挡板，用于阻挡轮前射流和引导气流提前内洗。

在前翼和前轮之间的车体部位也设计了翼片弯折的升力翼，又变为升流抑制器或挂在上方的细长小型翼片，这片翼片的作用与前悬翼片相似，通过将前翼气流向下偏转提高侧扩散器和尾翼的效率(图 10)。弯折部分呈现外洗的特点，产生的翼尖涡和前翼外洗涡融合，在轮胎上方产生外洗的涡流将乱流推离车体。

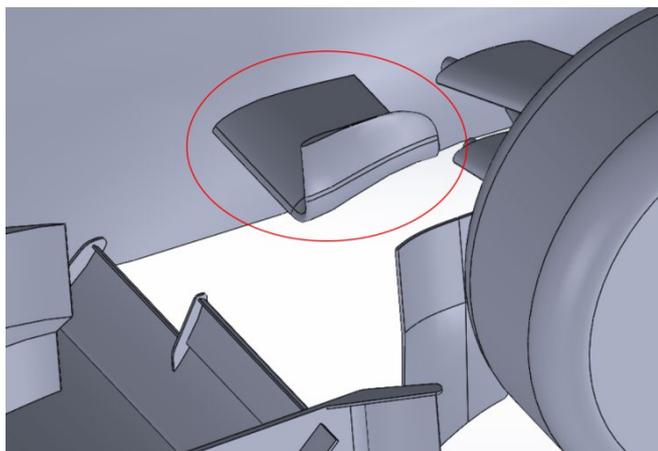


Figure 10. Upstream flow suppressor model  
图 10. 升流抑制器模型

### 3. CFD 仿真分析

对于空气动力学套件设计结果的评价通常采用 CFD 仿真的形式进行，通过该方法不仅可以快速对设计结果做出评价、节省大量时间和经济成本，还可以通过数值分析得到精准的流场状态，从而实现快速优化和迭代。

STARCCM+是一款流体力学有限元仿真软件，它将前处理、求解和后处理集成在一个界面中，同时凭借其强大的多面体网格技术和高效的多物理场耦合能力，在保证计算精度的前提下，显著提升了复杂仿真的效率和深度。因此本文使用 STAR CCM+有限元仿真软件对所设计的 FSAE 赛车空气动力学模型进行仿真，用于评价设计结果并分析得到优化方向。

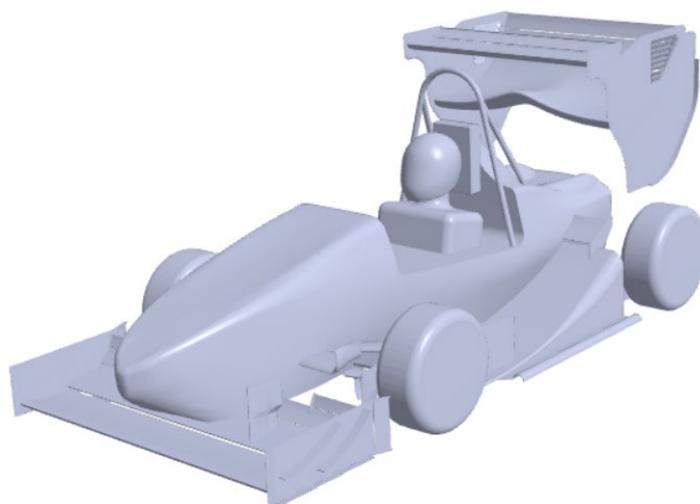
#### 3.1. 模型设置

根据上文提到的 FSAE 赛车空气动力学套件设计，创建气动仿真模型并导入 STARCCM+中(见图 11)。

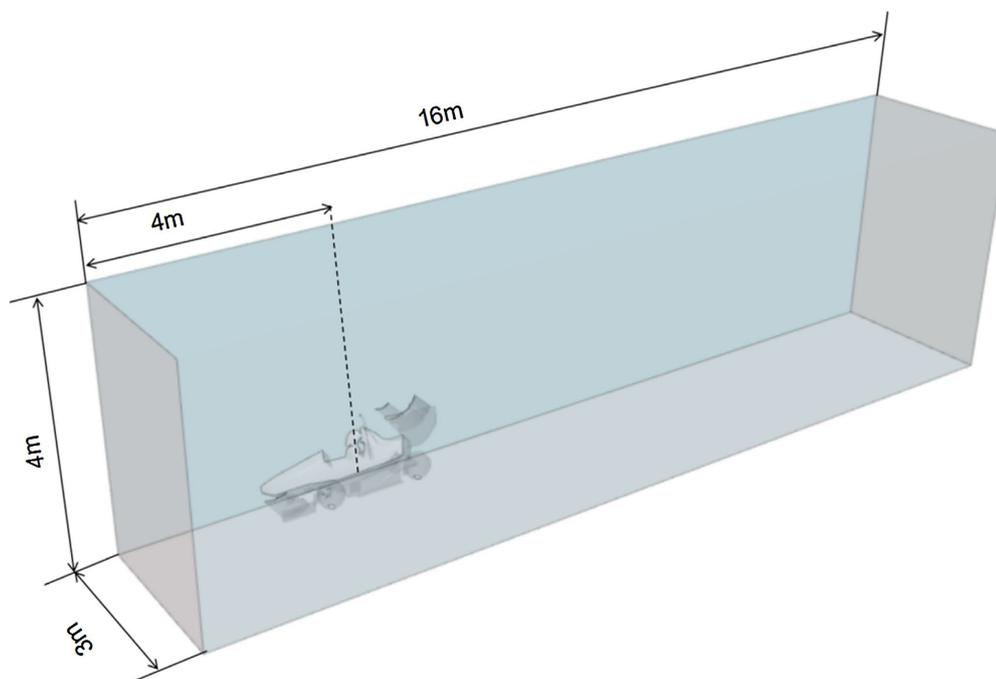
导入车辆模型后需要进行计算域的建模。计算域可以认为是一个虚拟的风洞，底部的地面与轮胎接触，而侧向和垂向需要留出足够的空间，防止壁面对流场的干扰。在本文使用的防止设置中，设置计算域为自建模原点向前 4 m、向后 12 m、侧向 3 m、垂向 4 m 的长方体区域。由于在直线工况下，对称设计的赛车左右的气体流动也将呈现对称特征，所以只需要对其中一半的车身进行仿真，即半模仿真，计算域的设置也只需要设置为一半即可。最后将计算域和车辆模型做一次布尔减运算即可得到仿真使用的流体模型(见图 12)。

#### 3.2. 仿真前处理

对仿真模型进行前处理设置，网格设置和模型选择如表 1 所示。



**Figure 11.** Vehicle aerodynamic simulation model  
**图 11.** 整车空气动力学仿真模型



**Figure 12.** Schematic diagram of the computational domain  
**图 12.** 计算域示意图

**Table 1.** Simulation grid and physical model settings  
**表 1.** 仿真网格和物理模型设置

| 网格类型      | 切割体 + 棱柱层网格 |
|-----------|-------------|
| 单元数量      | 1200 万 - 半模 |
| 默认单元尺寸    | 80 mm       |
| 边界层总厚度/mm | 8.8         |
| 边界层单元层数   | 5           |

续表

|          |                         |
|----------|-------------------------|
| 近壁层厚度/mm | 1                       |
| 底部气流网格加密 | 各向异性: z 向 5 mm          |
| 车体网格加密   | 各向同性: 25 mm             |
| 尾流网格加密   | 各向同性: 40 mm             |
| 车体表面网格设置 | Max: 20 mm, Min: 0.2 mm |
| 物理模型设置   | 稳态、恒密度、分离流、K-e 湍流       |
| 计算风速     | 22.22 m/s (80 km/h)     |

给流体模型的入口和出口分别赋予速度入口和压力出口的类型, 并设置速度入口速度为 22.22 m/s, 模拟 20 km/h 的车速; 设置地面的局部运动速度也为 22.22 m/s, 方向与气流方向一致, 用于模拟地面相对赛车的向后运动; 车辆轮胎表面单独设置局部旋转速度, 根据  $v = \omega \times r$  计算得到对应的轮胎旋转角速度, 并设置轮胎的旋转轴线(图 13)。

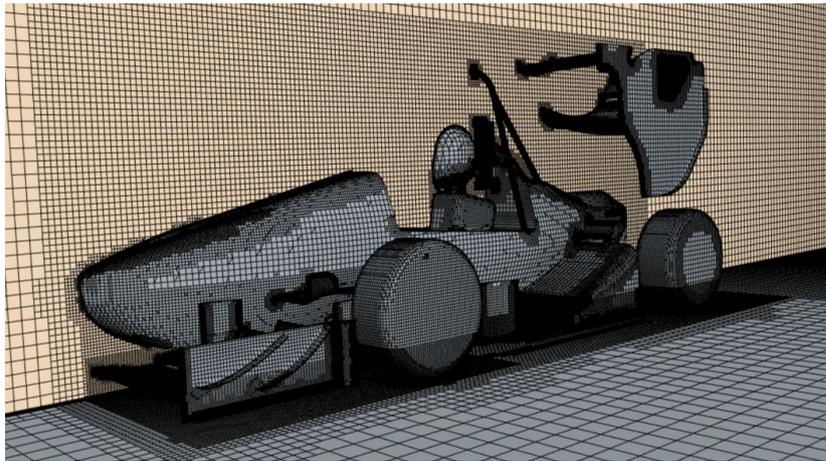


Figure 13. Diagram showing the mesh around the vehicle body  
图 13. 车体周围网格示意

### 3.3. 仿真结果分析

#### 3.3.1. 数值分析

除了标准的直线工况之外, 本文还对所设置的不同前后气动挡位进行了仿真, 仿真结果如表 2 所示。其中  $C_L \cdot A$  和  $C_D \cdot A$  皆通过以下公式换算得到:

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \cdot A \cdot \rho \cdot v^2$$

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \cdot A \cdot \rho \cdot v^2$$

观察上面的公式不难发现, 赛车的负升力和阻力与速度  $v$  的二次方、车辆迎风面积  $A$  成正比关系, 因此关注某一速度下的空气作用力大小或是升力阻力系数并没有实际意义。而通过比较  $C_L \cdot A$  和  $C_D \cdot A$  我们可以直观地对比不同赛车在不同速度下的气动表现, 并且通过这两个指标可以直接计算得到较为精确的不同速度下赛车的气动力特性。

**Table 2.** Simulation results of linear aerodynamic performance**表 2.** 直线空气动力学性能仿真结果

| 工况        | 性能指标          | 参数     |
|-----------|---------------|--------|
| 标准直线工况    | $C_L \cdot A$ | -5.25  |
|           | $C_D \cdot A$ | 1.72   |
|           | $L/D$         | 3.05   |
|           | 后轴气动载荷占比      | 48.74% |
| 前后低阻      | $C_L \cdot A$ | -4.56  |
|           | $C_D \cdot A$ | 1.31   |
|           | $L/D$         | 3.48   |
|           | 后轴气动载荷占比      | 39.63% |
| 前后高负升力    | $C_L \cdot A$ | -5.40  |
|           | $C_D \cdot A$ | 1.67   |
|           | $L/D$         | 3.23   |
|           | 后轴气动载荷占比      | 46.75% |
| 前高负升力/后低阻 | $C_L \cdot A$ | -4.59  |
|           | $C_D \cdot A$ | 1.30   |
|           | $L/D$         | 3.53   |
|           | 后轴气动载荷占比      | 37.79% |
| 前低阻/后高负升力 | $C_L \cdot A$ | -5.20  |
|           | $C_D \cdot A$ | 1.68   |
|           | $L/D$         | 3.10   |
|           | 后轴气动载荷占比      | 49.76% |

根据上述的仿真结果，赛车在不同的气动分配模式下  $C_L \cdot A$  取值范围为-4.56 到-5.40，在 15 m/s (54 km/h)的赛道平均速度和  $1.162 \text{ kg/m}^3$  的空气密度条件下可以产生 705.9 N 的负升力，这约为整车所受重力的 30%，可以明显提高赛车的弯道性能。标准以及高负升力设置下，赛车的前后气动力分配也较为接近 50%:50%的目标。同时，由于在低阻设置下尾翼的襟翼放平，整车  $C_D \cdot A$  可以降低到 1.3，相比于高负升力设置减少了 24.4%，减阻效果显著，在直线加速比赛中能有效提高成绩。

另外，设计的空气动力学套件中，前翼、尾翼和扩散器的负升力系数贡献大致相当，分别为-1.85、-1.93 和-1.74，可以发现这套空气动力学套件以前翼和尾翼为主要的负升力来源，底板扩散器的负升力占比明显低于一些地面效应为主导的赛车[4]。

### 3.3.2. 流场分析

在仿真后处理部分创建赛车的表面压力系数云图、总压截面图和 Q 准则涡图(图 14~16)。

压力系数  $C_p$  是一个无量纲数，用于描述物体表面某一点的压力相对于远处自由来流压力的高低，其表达为：

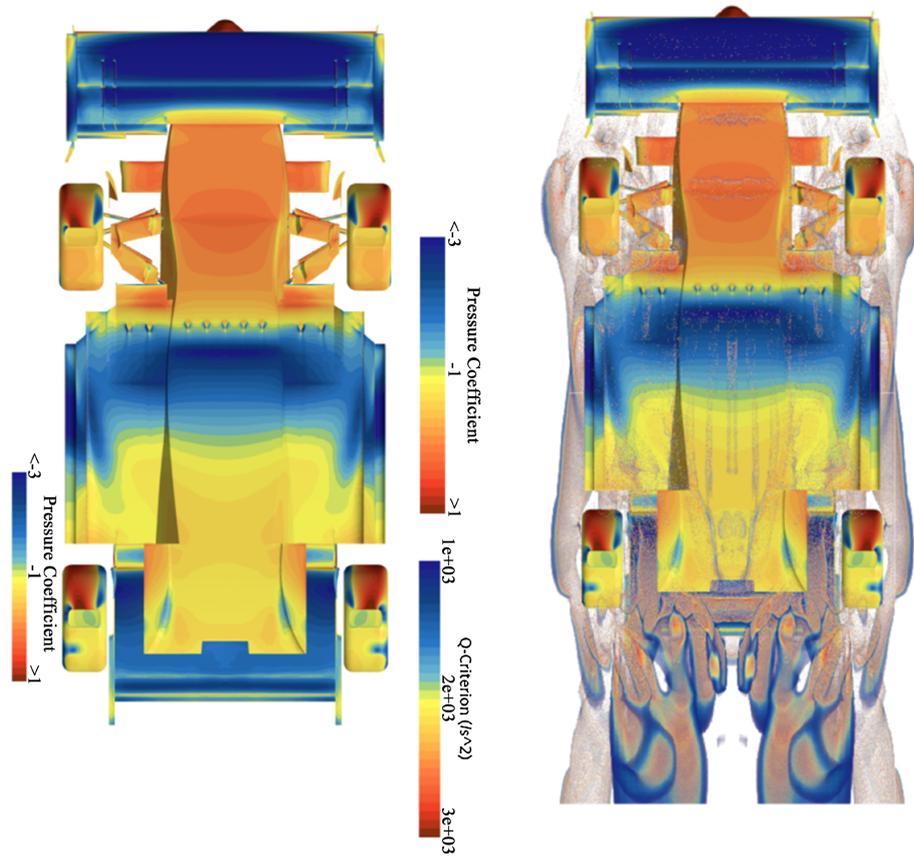


Figure 14. Pressure coefficient contour plot and Q-criterion vortex plot of the race car's underbody  
图 14. 赛车底部压力系数云图及 Q 准则涡图

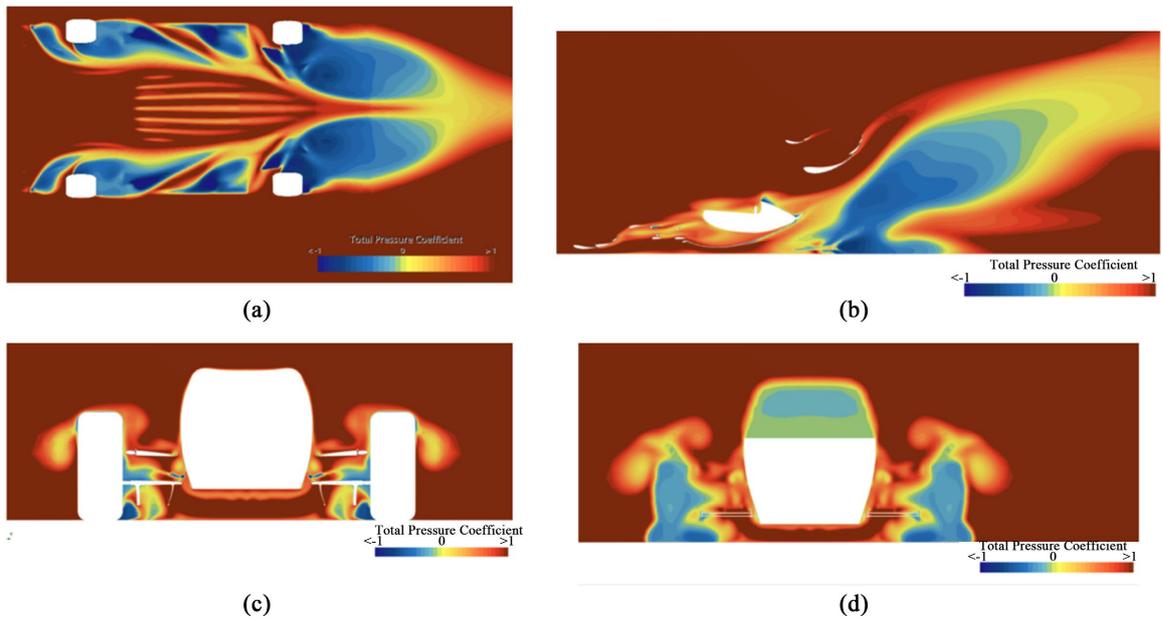


Figure 15. Contour plot of total pressure coefficient at key cross-sections of the race car. (a)  $z = 30$  mm cross-section; (b)  $y = 300$  mm cross-section; (c) Front wheel contact point cross-section; (d) Side diffuser inlet cross-section

图 15. 赛车关键截面总压系数云图。(a)  $z = 30$  mm 截面; (b)  $y = 300$  mm 截面; (c) 前轮接地点截面; (d) 侧扩散器入口截面

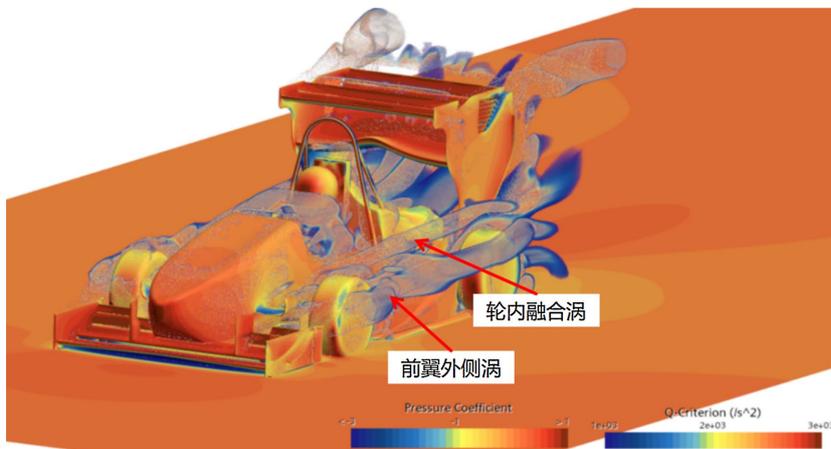


Figure 16. Racing pressure coefficient and Q-criterion vortex diagrams  
图 16. 赛车压力系数及 Q 准则涡图

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho_\infty v_\infty^2}$$

其中,  $p$  为物体表面某一点的静压, 即该点的实际压力;  $p_\infty$  指远方自由来流的静压, 可以理解为大气的压力;  $\frac{1}{2} \rho_\infty v_\infty^2$  是自由来流的动压, 是来流动能的一种度量, 其中  $\rho_\infty$  指来流的空气密度,  $v_\infty$  指来流速度。

压力系数的正负代表该点的静压相对于自由来流静压(即大气压力)的高低, 赛车负升力主要来源于底部的负压, 因此观察底部的压力系数图可以看到, 前翼、扩散器和尾翼各自在底部产生了大面积的负压区域, 这是赛车负升力的主要来源。扩散器中段有明显的向内侵入的低压区, 结合 Q 准则涡图可以发现是扩散器外部内洗的气流经过扩散形成的。因此地板扩散器的负升力一部分源于入口吸入气流的扩散, 另一部分来源于外部内洗气流的扩散。

在低速流动(马赫数小于 0.3)时, 可以认为空气是不可压缩流体, 由伯努利方程给出总压  $P_0$  的定义为:

$$P_0 = P_s + \frac{1}{2} \rho v^2$$

其中  $P_s$  为静压, 即流体本身实际的压力, 后面一项则为动压, 是单位体积流体因运动所具有的动能。总压代表了流体中机械能的总和, 反应的是气体可利用的能量的高低。对于赛车空气动力学套件设计而言, 要保证空气动力学套件尽可能多地利用高总压气流, 追求最小的总压损失, 避免低总压气流入侵造成气动效率下降。

从赛车各关键截面的总压系数图可以发现, 近地面的气流总体呈现内洗的趋势, 流经前翼端板、车轮和侧扩散器保压条的过程中均发生了较大的总压损失。分析前轮附近的总压截面可以发现, 尽管轮边翼片组将一部分低能气流推向外侧, 但仍然有部分低总压气流进入扩散器入口, 且扩散器扩散角过大导致扩散器后部的气流发生分离, 损失了大量的总压。

观察赛车整体的 Q 准则涡可以看到由前翼创造的外侧涡流以及轮内由前翼襟翼、升流抑制器、旗翼等结构共同产生的融合涡一直延伸到后轮, 并避开了尾翼端板和内部的关键部位, 达成了设计的目标。

#### 4. 总结与展望

本文以整车流场整合的思路设计了一套 FSAE 赛车空气动力学套件并使用 STARCCM+进行了 CFD

仿真。根据 CFD 仿真结果, 本文所设计的 FSAE 赛车空气动力学套件负升力系数、升阻比等性能参数均达到设计目标, 提出了一种以前后翼为主要负升力来源的高性能 FSAE 赛车空气动力学套件, 且该设计多采用定截面设计, 多处采用相同翼型以便于共用模具, 具有良好的加工性和经济性。

经过对仿真结果的进一步分析, 本文针对本次设计提出以下优化建议, 供后续研究人员参考:

(1) 应当遵循气流运动的客观规律, 前翼端板后缘近地面处气流由于内外压差自然地产生内洗的趋势, 此时不应继续使用外洗和保压的设计, 这将导致更强烈的内洗和气流分离。应当在此处降低内外压差并引导气流提前内洗, 减弱前轮射流的强度, 并通过悬架和轮边的翼片承接内洗气流, 在轮后进行外洗的处理。

(2) 扩散器后段扩散角过大, 必然引起气流分离和总压损失, 因此需要降低扩散器扩散角, 或是使用翼片式扩散器。

(3) 车身中部和外部的总压气流利用不够充分, 可以引导中部气流外洗到两侧侧扩散器处, 以及接纳外部内洗的高能气流进入扩散器, 提高扩散器工作效率。

尾翼在两侧的主翼攻角较低, 此处受到前翼和扩散器上洗气流影响, 实际攻角将小于设计攻角, 因此可以使用更加激进的攻角设计以获得更高的负升力。

## 基金项目

季华实验室科研项目(X220011TN220)。

## 参考文献

- [1] Milliken, W., Milliken, D. and Metz, L. (1995) *Race Car Vehicle Dynamics*. SAE International Warrendale.
- [2] 2025 中国大学生方程式汽车大赛组委会. 2025 中国大学生方程式汽车大赛规则[R]. 北京: 中国汽车工程学会, 2025.
- [3] Sriram, P.S., Gopalarathnam, A. and Misenheimer, A. (2012) High-Downforce Airfoil Design for Motorsports. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, **5**, 478-489. <https://doi.org/10.4271/2012-01-1168>
- [4] 邓进福. 开轮式类 F1 赛车气动特性的数值分析及实验研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2015.