

FSAE赛车多工况CFD仿真及流场分析

王广福^{1,2}, 刘嘉骥^{1,3}, 盛选禹^{1,3*}

¹季华实验室, 广东 佛山

²中国煤炭科学研究院矿山人工智能研究所, 北京

³清华大学机械工程系, 北京

收稿日期: 2025年12月18日; 录用日期: 2025年12月30日; 发布日期: 2026年3月18日

摘要

本文针对大学生方程式赛车(FSAE)在多工况下的空气动力学特性问题, 以山东大学2025赛季E17赛车为研究对象, 基于STARCCM+软件开展了针对俯仰、偏航及稳态绕环三类典型工况的CFD仿真分析。通过构建多组仿真模型, 系统研究了不同工况下整车负升力、阻力、升阻比及气动平衡等气动特性的变化规律。结果表明: 俯仰工况下, 整车负升力随俯冲角增大而上升, 但极端俯冲姿态下前翼气流分离会导致负升力骤降; 偏航工况中, 负升力与升阻比随偏航角增大而下降, 12°偏航时负升力系数下降约18.1%; 稳态绕环工况下, 负升力系数较直线工况下降11.2%, 前翼表现出较高的偏航敏感性。研究揭示了赛车在极端工况下气动特性突变的风险, 提出前翼等关键部件应以气动敏感性优化为核心的优化方向, 为FSAE赛车高性能空气动力学套件的设计与验证提供了理论依据与方法参考。

关键词

大学生方程式, 空气动力学, 有限元, 气动敏感性

FSAE Racing Car Multi-Condition CFD Simulation and Flow Field Analysis

Guangfu Wang^{1,2}, Jiaqi Liu^{1,3}, Xuanyu Sheng^{1,3*}

¹Ji Hua Laboratory, Foshan Guangdong

²Research Institute of Mine Artificial Intelligence, Chinese Institute of Coal Science, Beijing

³Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing

Received: December 18, 2025; accepted: December 30, 2025; published: March 18, 2026

Abstract

This paper addresses the aerodynamic characteristics of FSAE racing cars under multiple operating

*通讯作者。

文章引用: 王广福, 刘嘉骥, 盛选禹. FSAE 赛车多工况 CFD 仿真及流场分析[J]. 流体动力学, 2026, 14(1): 75-89.

DOI: 10.12677/ijfd.2026.141008

conditions. Taking Shandong University's 2025 season E17 racing car as the research subject, CFD simulation analyses were conducted using STARCCM+ software for three typical operating conditions: pitch, yaw, and steady-state looping. By constructing multiple simulation models, the study systematically investigated the variation patterns of aerodynamic characteristics—including overall downforce, drag, downforce-to-drag ratio, and aerodynamic balance—under different operating conditions. Results indicate: Under pitch conditions, overall downforce increases with greater dive angles, but extreme dive attitudes cause front wing flow separation, leading to a sudden drop in downforce. During yaw conditions, both downforce and downforce-to-drag ratio decrease with increasing yaw angles; at 12° yaw, the downforce coefficient drops by approximately 18.1%. During steady-state looping maneuvers, the downforce coefficient decreased by 11.2% compared to straight-line conditions, with the front wing exhibiting high yaw sensitivity. This study reveals the risk of abrupt aerodynamic behavior changes in racing cars under extreme conditions and proposes that critical components like the front wing should prioritize aerodynamic sensitivity optimization. It provides theoretical foundations and methodological references for designing and validating high-performance aerodynamic kits for FSAE racing cars.

Keywords

FSAE, Aerodynamics, Finite Element Method, Aerodynamic Sensitivity

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. 引言

大学生方程式系列赛事在国际上发展超过 40 年，其自 2010 年进入中国后迅速成为了机械工程领域最具影响力的大学生竞赛之一。大学生方程式赛车(FSAE)的各项设计都需要在每年颁布的赛事规则限制之内进行，竞赛赛道也呈现多弯、低速的特点。赛车的空气动力学对于 FSAE 赛车的性能与竞赛表现影响巨大，竞赛不仅考验赛车标准直线工况下的气动性能，更对其俯仰、弯道、偏航等多工况的气动性能提出要求。

国内外院校和参赛队伍对于 FSAE 赛车的空气动力学展开了许多研究：陈冀宁等[1]通过对不同轴距的赛车使用 VI-grade 模拟软件进行圈速模拟，指出长轴距构型带来的空气动力学优势能够克服其对于整车灵活性的影响并提高圈速表现；何俊彪等[2]基于 CFD 仿真开发了一套高性能的 FSAE 空气动力学套件，并通过展示速度、压力云图和涡量图说明其设计的可行性；Diasinos S 等[3]指出较短翼展下近地面的倒置机翼气流附着能力优于长翼展翼片。

同时，针对一些特定工况也有相应的研究成果，如梁德慧等[4]提出一种针对 FSAE 赛车稳态转向工况的场函数仿真方法；赖晨光等[5]的研究揭示了赛车在不同横摆角工况下的气动表现；于志龙等[6]基于重叠网格法对 FSAE 赛车的底部涡流在离地间隙变化的侧倾和偏航工况下的敏感性进行了仿真与风洞实验分析。

然而现有研究多专注于对某一工况进行分析，对于 FSAE 赛车空气动力学套件在不同工况下的综合气动性能和外流场流态的系统分析仍显不足，很多参赛队伍缺少基于多工况目标下赛车空气动力学性能的仿真和评价方法。本文以山东大学 2025 赛季 E17 赛车作为仿真对象，使用 STARCCM+软件对该赛车俯仰、偏航和稳态回转工况进行 CFD 仿真，并分析其气动设计对于各工况外流场特性的影响，提出优化设计方法。旨在提出针对 FSAE 赛车多工况目标的优化设计和验证方法，为 FSAE 赛车高性能空气动力

学套件设计提供一定的理论参考。

2. 理论基础

2.1. 汽车动力学中的气动影响

在汽车动力学[7]中,车辆的坐标系指定如下: x 轴沿车辆纵向指向前方, y 轴沿车辆横向指向右侧, z 轴沿车辆法向指向上方(图 1)。车辆在运动过程中受到来自空气的力的作用。其中,对于车辆的赛道表现影响较大的为沿 X 轴方向的阻力和沿 Z 轴的升力(在赛车中通常方向指向负向,称为负升力)。气动阻力直接影响赛车的加速和极速性能,而气动负升力则影响赛车的弯道表现。

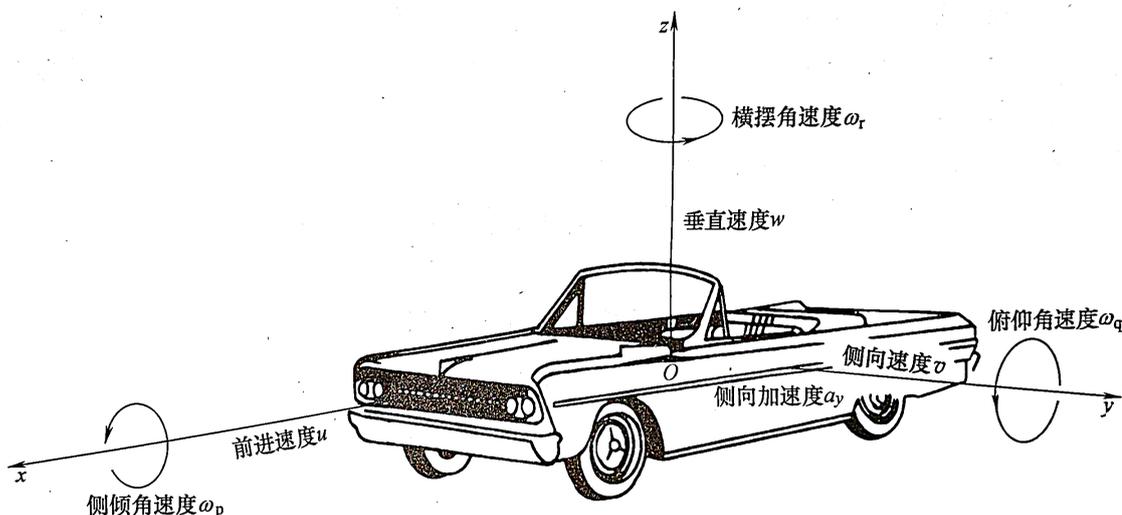


Figure 1. ISO vehicle coordinate system designation

图 1. ISO 车辆坐标系指定

赛车在赛道上竞赛时,轮胎工作在附着力的极限附近,此时轮胎垂向力直接关系到赛车轮胎的附着力。而赛车的气动负升力能够在增加轮胎垂向力的同时较少地增加整车质量,从而大幅度提高弯道中轮胎的附着力和赛车过弯时的侧向加速度。因此,高负升力的赛车空气动力学对于赛车的性能提升具有理论支持。

气动中心指在车辆上,其总气动力的合力作用点。即可以将作用在赛车各个表面的气动力等效于一个集中力,这个集中力的作用点就是气动中心。气动中心相对于质心的位置将决定气动力对整车的力矩方向,从而影响车辆前后轴气动力的分配。对于赛车气动力的分析我们通常只关心阻力和负升力, Y 向气动力合力较小,可以忽略不计,因此可以近似地在 XOZ 平面上进行描述。由于赛车具有负升力,所以总气动力指向车辆的后下方。当经过气动中心的气动力作用线位于质心之前时,气动力对车辆的力矩沿顺时针方向,前轴受到气动力垂向的分量大于后轴。随着速度的提升,气动力增加,前后轴垂向力差距逐渐扩大,前轮的垂向力增长大于后轮,整车呈现越发严重的转向过度。若气动力作用线位于质心之后,则整车将随着速度上升呈现越发严重的转向不足。将气动合力在前后轴引起的垂向力的比例称为整车的气动平衡(图 2),理想的气动平衡应该与质心引起的垂向力平衡相同,即气动力合力作用线穿过质心,因而不会对车辆原有的转向特性产生影响。

综上所述,空气动力学套件产生的气动力不仅对赛车的操纵性、动力性和经济性产生直接影响,还可以通过整车气动平衡改变车辆的转向特性。所以本文中主要关注的空气动力学指标包括负升力、阻力、

升阻比和气动平衡(以后轴气动力分配百分比表达)。

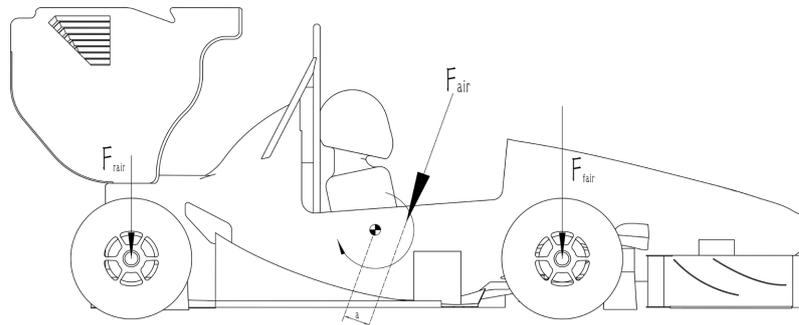


Figure 2. Schematic diagram of pneumatic balance
图 2. 气动平衡示意图

2.2. 赛车空气动力学

赛车在行驶过程中受到的气动力中,阻力和负升力对于赛车性能影响较大,两者可通过以下公式计算得到:

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

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

其中, A 为迎风面积, ρ 为空气密度, v 为空气和车辆的相对运动速度。 C_L 为升力系数, C_D 为阻力系数,这两个系数与车辆外形有关,与迎风面积大小无关。对于赛车而言,不同的空气动力学套件迎风面积不同,因此相同系数在相同工况下的气动力大小也不同,因此我们更关注 $C_L \cdot A$ 和 $C_D \cdot A$ 这两个参数,并可以通过这两个参数直接计算不同速度和空气密度条件下赛车的气动性能。

为了对空气动力学套件做出优化设计,除了关注总体的气动性能指标,还需要通过观察流场形态对气动套件的工作情况做出评估。John Anderson 所著的《Fundamentals of Aerodynamics》[8]中提到机翼产生升力的原理从根本上来说是改变了来流空气的动量,而赛车空气动力学套件产生的负升力一方面来源于倒置的机翼对于气流向上偏转的作用(称为上洗),另一方面来源于部分气流的加速。

气流加速产生的负升力也存在两种情况。根据流体力学中伯努利方程:

$$C = P + \frac{\rho v^2}{2} + \rho gh$$

在车身的小尺度下可以忽略第三项高度差带来的压力差,当气流速度 v 越高,第二项在常数 C 中的占比将提高,从而降低静压 P ,得到气流速度越快,压强越低的结论。

在第一种情况下,根据文丘里效应: $Q = A_1 v_1 = A_2 v_2$, 可得对于不可压缩流体而言,单位时间通过两个面积不同的截面的流量相同,故截面上的速度和截面面积成反比。赛车的速度低于 0.3 马赫,此时的气流可以认为是不可压缩流体,其前翼下方和底板扩散器下方与地面形成了一个文丘里通道,对近地面的气流具有强烈的加速作用,因而可以大幅度降低底板表面的压力产生负升力。

在另一种情况下,赛车表面的气动结构会在下游产生一些涡流,这些涡流是围绕着涡核高速旋转的气体,具有较高的能量和较低的压强。当这些涡流附着在赛车的下表面时,会降低附着位置的局部压强,产生负升力。因此,赛车空气动力学套件设计中,对于涡的控制和利用十分重要。

相同的位置在不同车速下 CFD 仿真得到的表面压力值不同, 所以常用压力系数来评价。通过观察表面压力系数可以快速找到工作效率较高的低压区域, 如果翼片和扩散器的底部有部分区域压力系数偏高, 则代表该位置产生的负升力较低甚至可能产生升力, 那么在这里气流可能已经失去附着或是能量较低。压力系数表达为:

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

p : 物体表面某一点的静压, 即该点的实际压力;

p_∞ : 远方自由来流的静压, 可以理解为大气的压力;

$\frac{1}{2} \rho_\infty v_\infty^2$: 自由来流的动压, 其中 ρ_∞ 指来流的空气密度, v_∞ 指来流速度。

气流中蕴含的机械能决定了其被空气动力学套件利用的上限, 使用总压 P_0 来表示:

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

总压高的气流含有较高的机械能, 流经空气动力学套件时可以产生较大的负升力; 反之, 低总压气流由于缺乏可利用的能量, 将降低空气动力学套件的工作效率。所以在仿真过程中总压及总压系数也是重点的关注对象。而在优化设计中, 需要避免将低总压气流引入赛车的空气动力学套件造成其工作效率降低。

3. 俯仰工况仿真

赛车在直线行驶过程中常伴随剧烈的加速和减速, 在减速过程中车辆产生前轴车身下沉, 后轴车身抬高的俯冲姿态; 反之, 加速过程前轴抬高, 后轴下沉。随之而来的是空气动力学套件的离地间隙和攻角变化, 这种变化可能导致赛车气动特性的大幅度改变, 所以在 CFD 仿真重是需要重点关注的一种工况。

3.1. 仿真设置

为了方便建模, 本文以整车俯仰中心为旋转轴线, 对除了车轮和悬架杆系以外的车身及空气动力学套件实体模型进行旋转操作, 并通过约束旋转后轮芯轴线对应的车身某点的 z 坐标值变化量以模拟车辆的俯仰工况(图 3)。

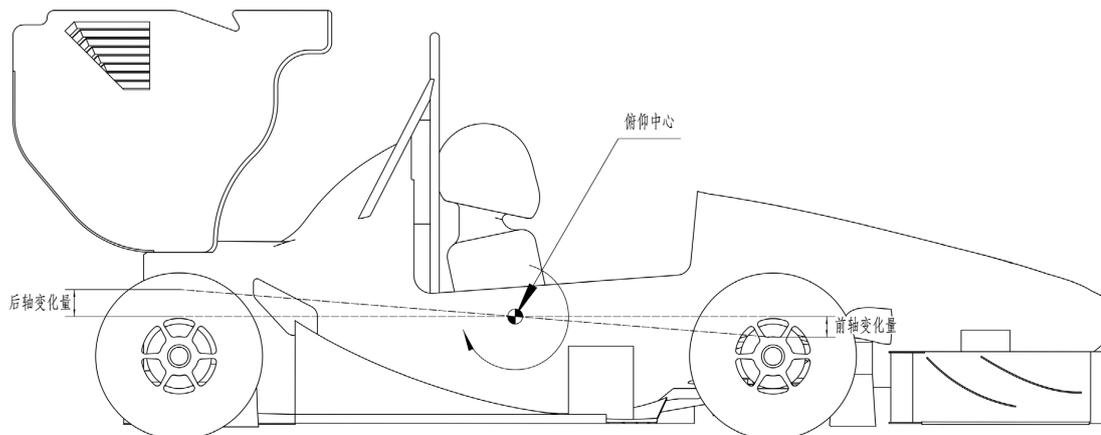


Figure 3. Schematic diagram of pitch model

图 3. 俯仰模型示意图

根据赛车实际工作条件, 设定前后轴的运动区间为+10 mm 到-20 mm, 并以 5 mm 为步长对该区间内的 49 组数据进行俯仰模型搭建。

由于各组模型差别仅有车身的俯仰角度, 所以可以使用统一的前处理参数。因俯仰仿真是直线工况, 车身左右对称, 可以使用半模仿真减少计算量。网格设置和模型选择如表 1 所示, 网格划分结果如图 4 所示。

Table 1. Mesh and physical model settings

表 1. 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	1.3×10^7 -半模
默认单元尺寸	Max: 80 mm/Min: 10 mm
边界层总厚度/mm	15 (车底 8.8)
边界层单元层数	5
近壁层厚度/mm	1.5 (车底 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	15 m/s (54 km/h)

设置流体域入口速度 15 m/s, 并将地面切向速度设置为-15 m/s 以模拟赛车行驶工况。四轮单独设置局部旋转速率, 使得轮胎接地点的线速度与地面切向速度一致。

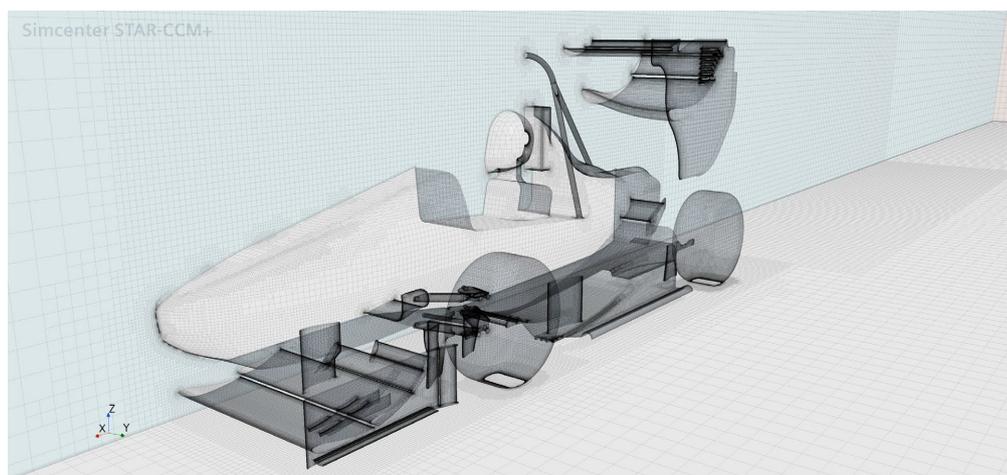


Figure 4. Schematic diagram of the pitch and yaw simulation grid

图 4. 俯仰仿真网格示意

3.2. 仿真结果分析

对上文设置的 49 组模型分别进行仿真, 待残差降低至 10^{-3} 以后可认为结果收敛到一个较为可信的程

度。将各组仿真得到的整车负升力、阻力和后轴气动力比例记录到表格中，并分别以前、后轴高度变化量为纵横坐标，使用 matlab 绘制 map 图如图 5 所示。

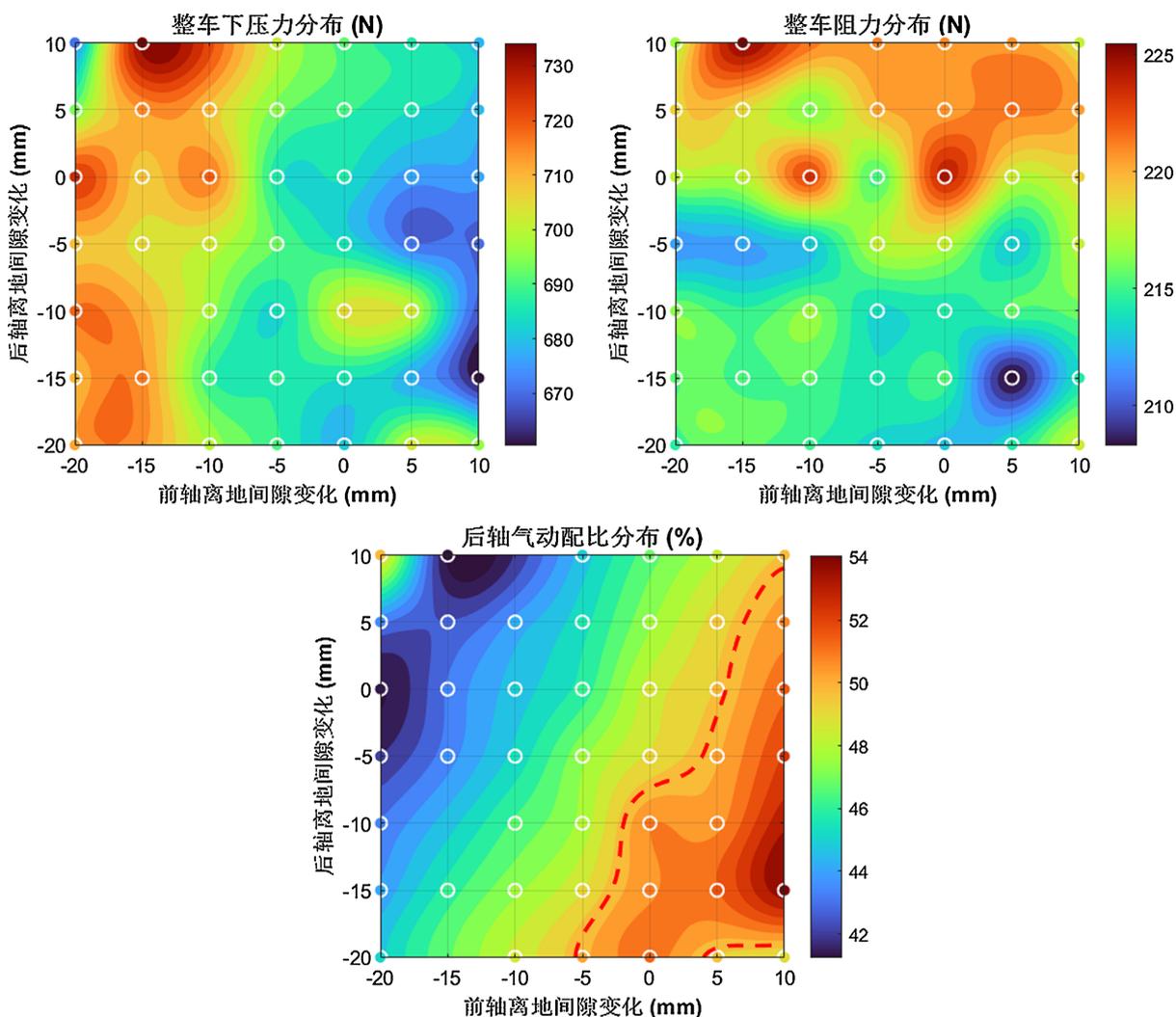


Figure 5. Vehicle pitch aerodynamic characteristics diagram

图 5. 整车俯仰气动特性图

图中红色虚线为前后轴 50%:50%气动分配线，观察到整车下压力随着车辆俯角增加呈现上升趋势，而随着仰角增大呈现下降趋势。这是因为整车俯冲时前翼离地间隙变小、前翼尾翼攻角增加，从而使得前后下压力均增加。整车阻力随着后轴的上升而升高，这是由于车辆(特别是尾翼)攻角增加、迎风面增加导致。整车气动力的分配随着俯角的增加向后移动，比例变化最高可达到 12%。赛车在正常直线工况下的后轴气动分配约为 48%，制动时气动分配前移，加速时气动分配后移。可以发现整车的气动平衡和近地面空气动力学套件的工作效率关系密切，前翼和扩散器的离地间隙敏感性将直接决定整车的俯仰气动特性。这辆赛车在直线行驶时，虽然前后轴高度会随着速度变化上下改变，但是气动平衡在前后轴同时升降的工况下仍能够保持稳定。

在图中前-20 后 10 的工况出现了下压力的骤降和后轴气动分配的上升，观察该工况下的底板压力系数(图 6)、 $Y = 400 \text{ mm}$ 以及 $Z = 30 \text{ mm}$ 截面的总压系数(图 8、图 9)可以发现前翼尾端出现剧烈的气流

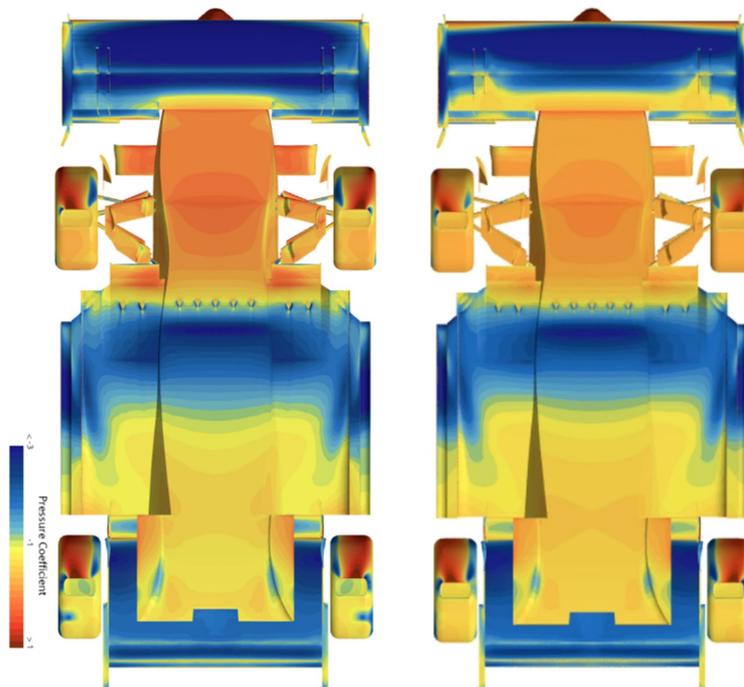


Figure 6. Comparison of underbody pressure coefficients under standard operating conditions (left) and pre-20/post-10 operating conditions (right)
图 6. 标准工况(左)与前-20 后 10 工况(右)车底压力系数对比

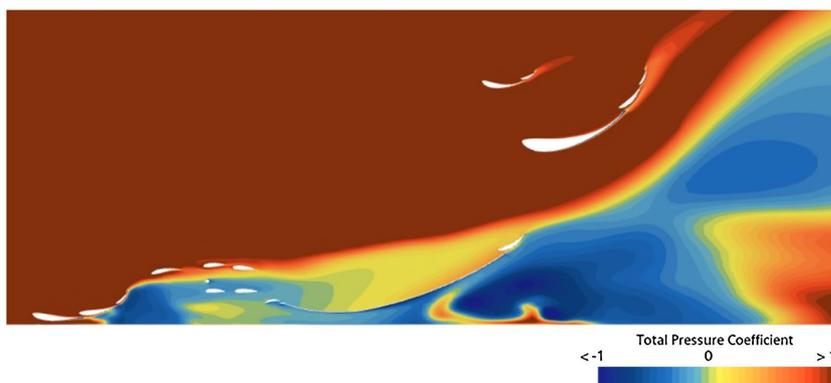


Figure 7. Y = 400 mm section total pressure coefficient diagram
图 7. Y = 400 mm 截面总压系数图

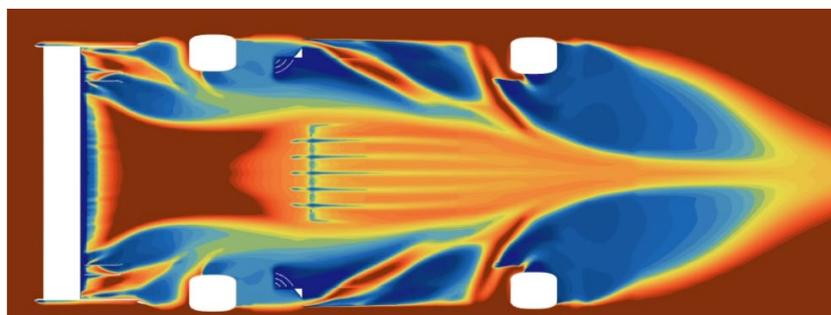


Figure 8. Total pressure coefficient diagram at Z = 30 mm cross-section
图 8. Z = 30 mm 截面总压系数图

分离,产生的低能气流一方面使得前翼后半段的压力系数升高,另一方面扩散器的压力系数也出现了小幅度上升。这使得前翼和侧扩的负升力降低,整车下压力下降的同时尾翼在整车下压力中占比提高,气动载荷后移。

结合赛车的悬架设计,只需要保证发生气动特性突变的前-20 mm 后 10 mm 俯冲工况不在赛车俯仰的机械工作区间之内就可以杜绝这种突变引发的失控风险。而观察俯仰 map 图,发生突变的点位于左上角,对应赛车最大的俯冲姿态,其余姿态下没有负升力的骤降情况,可以得到赛车俯仰敏感度处于可接受的区间。

4. 偏航工况仿真

根据竞赛规则[9],高速避障和耐久赛赛道上将布置蛇形绕桩环节,并且赛车在转向时还可能面临侧风的影响,因此有必要进行偏航工况的仿真。

4.1. 仿真设置

赛车在转向过程中,车身会发生侧倾,同时前轮将基于转向系统设计的几何关系围绕主销产生转角。需要根据侧倾角公式计算车身侧倾角,并以车身侧倾中心为轴旋转车体模拟车辆的侧倾姿态。车身侧倾角公式如下:

$$\phi = \frac{m \cdot a_y \cdot h_{RC}}{\frac{1}{2} K_{wf} \cdot t_f^2 + \frac{1}{2} K_{wr} \cdot t_r^2}$$

m : 车身质量; A_y : 横向加速度; h_{RC} : 质心到侧倾轴的垂直距离; K_{wf} 、 K_{wr} : 前后轮位等效弹簧刚度; t_f 、 t_r : 前后轮轮距。

得到整车转向工况下的仿真模型如图 9、图 10 所示。由于涉及多角度偏航仿真,在进行模型设置的时候需要根据设计的偏航角度对转向角度进行一定的微调。

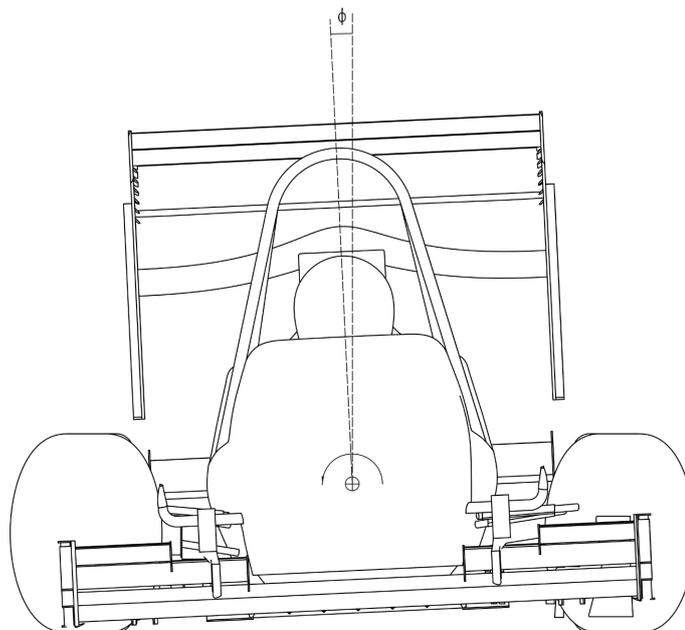


Figure 9. Vehicle body tilt diagram
图 9. 整车侧倾示意图

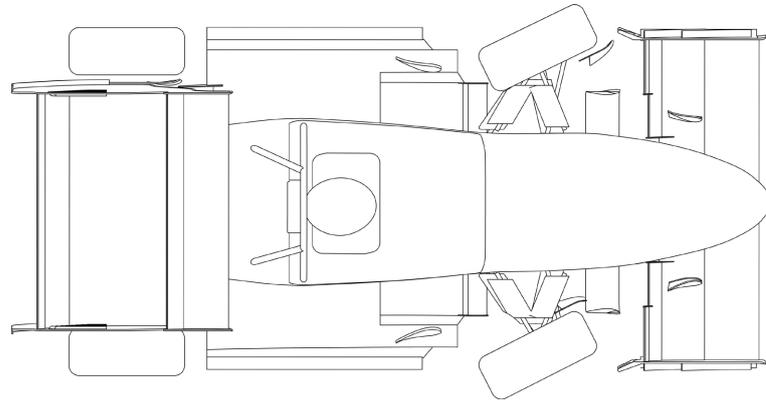


Figure 10. Vehicle steering diagram
图 10. 整车转向示意图

得到仿真模型后进行前处理操作。由于模型和偏航的流态已经不再具有对称特征，故不能进行半模仿真，且在 Y 向需要设置更大的计算域空间让横向的气流充分发展。同时，为了模拟来流和车辆的角度关系，车辆整体与计算需要绕 Z 轴相对旋转一定角度，该角度即为仿真所设计的偏航角。本文中针对赛车 $0^{\circ}\sim 12^{\circ}$ 范围内的偏航工况进行仿真，步长为 2° ，除去 0° 的直线工况已经在前文俯仰工况中得到数据之外，共设置 6 组进行仿真。计算域设置如图 11 所示，前处理各项设置如表 2 所示。

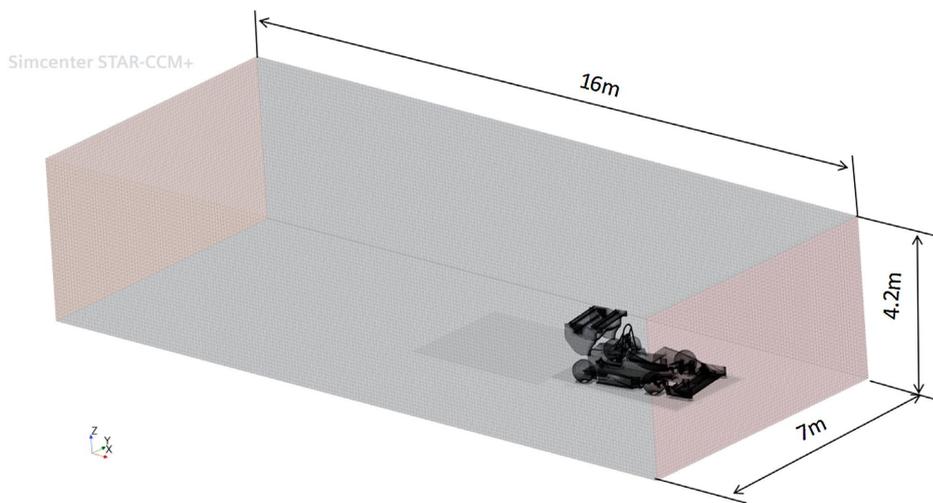


Figure 11. Calculation domain settings
图 11. 计算域设置

Table 2. Yaw simulation pre-processing setup
表 2. 偏航仿真前处理设置

网格类型	切割体 + 棱柱层网格
单元数量	2.47×10^7 -全模
默认单元尺寸	Max: 80 mm/Min: 10 mm
边界层总厚度/mm	8
边界层单元层数	5
棱柱层延伸率	1.2

续表

车体网格加密	各向同性: 20 mm
尾流网格加密	各向同性: 35 mm
车体表面网格设置	Max: 10 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	15 m/s (54 km/h)

与直线工况的仿真相同，需要单独设置轮胎旋转速率和地面的切向速度，用于模拟赛车在静止的地面形式时的状态。

4.2. 仿真结果分析

对仿真得到的 6 组数据再加上标准直线工况数据整理得到图 13 所示折线图。整车负升力、阻力的数值及其系数随着偏航角的增加而降低，同时后轴的气动力分配比例、升阻比也有随着偏航角增加而下降的趋势。由于仿真过程中直接设置的是计算域的入口速度，赛车本身的速度应该乘以偏航角的余弦，

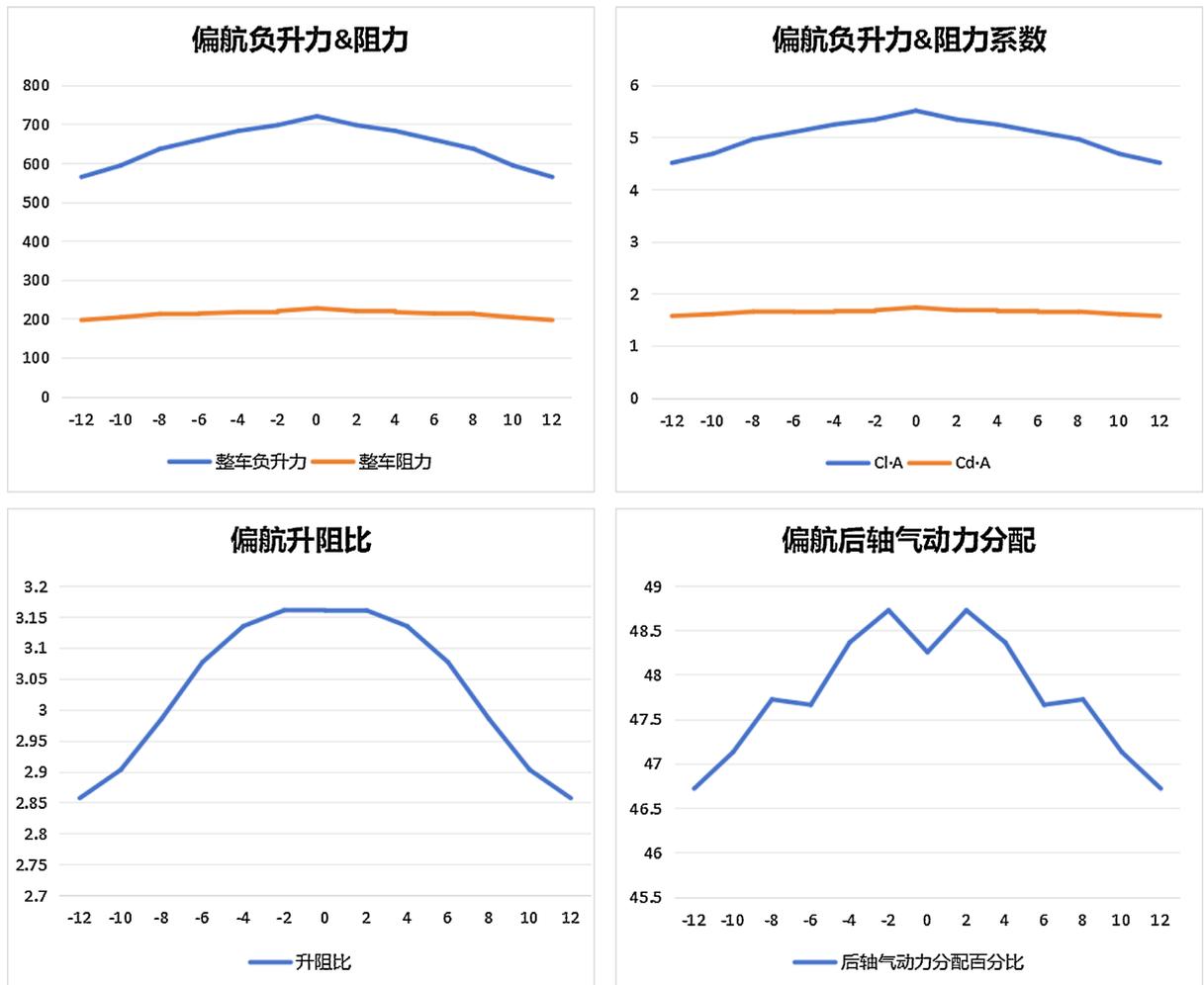


Figure 12. Vehicle yaw angle under various operating conditions (line graph)

图 12. 整车偏航工况折线图

故整车气动力系数相比气动力的数值更有参考价值。12°偏航工况下整车负升力系数为4.52，相比直线工况下降了18.1%，对比于志龙等人论文中吉林大学2023年冠军赛车E67在CFD中12°偏航工况负升力损失约17%的结果[7]，可以认为偏航敏感性处于可接受的区间。

观察12°偏航工况下的压力系数和总压组合图(图14)，可以发现偏航时由于来流角度的关系，外侧轮的乱流区域大幅度减少，外侧的底板工作状态好于直线工况，但是气流总体由内侧向外侧流动使得外侧底板缺少Y向来流产生的涡负升力；内侧底板由于wake侵入工作效率大幅度降低，但是Y向来流的涡负升力依然存在且仍保持一定强度，对比直线工况的压力系数可以发现这部分涡负升力受到偏航的影响较小。如果内侧底板入口在偏航时无法避免低能气流的侵入，那么利用Y向来流会是补充下压力、降低偏航敏感性的一个方法。

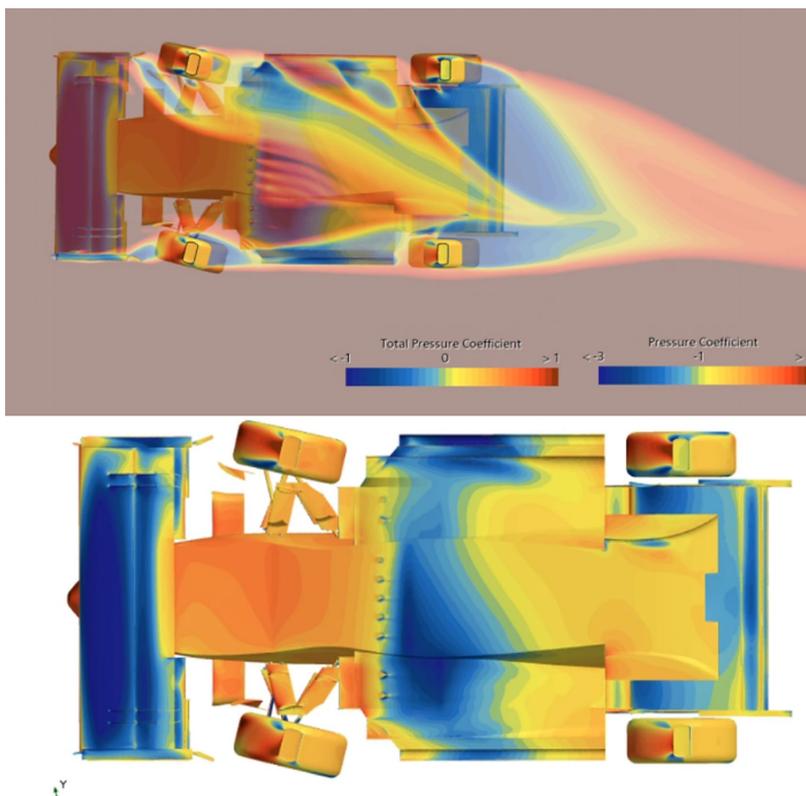


Figure 13. Combined diagram of 12° yaw pressure coefficient and total pressure
图 13. 12°偏航压力系数和总压组合图

5. 稳态绕环仿真

根据2025中国大学生方程式系列赛赛事规则，赛车的动态测试中有一项八字绕环测试，该项目要求赛车以最快速度绕如图15所示的双环赛道行驶，且不与内外侧桩桶发生碰撞。这考验的是赛车的稳态绕环能力，赛道中赛车平均速度约为50 km/h，此时气动负升力对于赛车最大侧向加速度增益较大，是赛车空气动力学套件设计的重要目标工况之一。并且该工况较为简单，在CFD仿真中也较容易实现。不同于梁德慧等人使用的场函数方法[4]，本文将采用旋转坐标系法对稳态回转工况进行仿真。

5.1. 仿真设置

由于稳态回转也属于转向工况，车身侧倾和前轮转角特性于上文偏航工况较为相似，故赛车仿真

模型可以直接调用偏航仿真中的模型。

为了模拟八字绕环的环状弯道，配合旋转坐标系方法，流体域也需要创建为以赛车回转中心为圆心的环状(图 15)。在实际驾驶过程中，车手往往紧贴赛道内侧行驶，考虑赛车宽度并留出一定余量，设置赛车质心回转半径为 8.5 米。在理想情况下，汽车转向时回转中心位于两个前轮的轴线和后轮轴线的交点，但是考虑赛车激烈驾驶情况下带有剧烈的轮胎滑移，需要将回转中心向前移动。

模型前处理设置如表 3 所示。

使用旋转坐标系法进行仿真时需要新建一个旋转参考系，根据流体域实际情况设置旋转轴线与环状流体域圆心重合，旋转速度参考往届赛事成绩定为 0.2 rps，即 5 秒完成一圈。

将整体区域、车辆壁面、流体域壁面、地面表面的运动参考系设置为旋转参考系，而速度入口和压力出口表面设置在全局参考系下，同时速度入口的速度值设置为 0。为了模拟赛车在弯道中的气流，根据

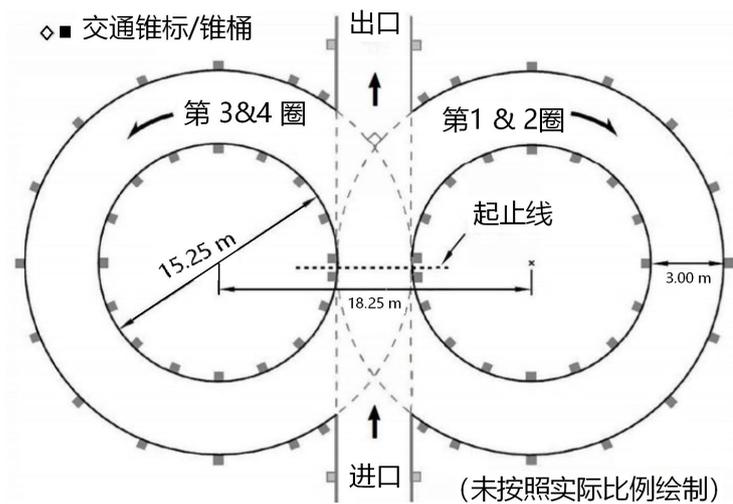


Figure 14. Figure-∞ loop track diagram
图 14. ∞字绕环赛道示意

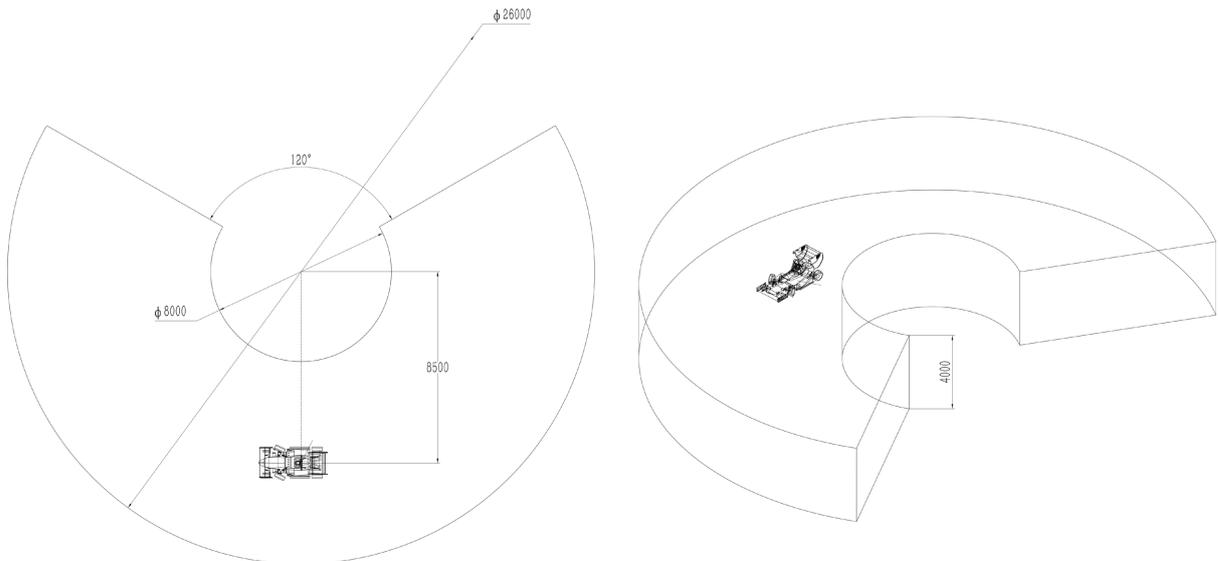


Figure 15. Steady-state simulation of fluid domain around a ring
图 15. 稳态绕环仿真流体域

Table 3. Pre-processing settings for steady-state loop simulation
表 3. 稳态绕环仿真前处理设置

网格类型	切割体 + 棱柱层网格
单元数量	2.737×10^7
默认单元尺寸	Max: 80 mm/Min: 10 mm
边界层总厚度/mm	12
边界层单元层数	5
近壁层厚度/mm	1.5
车体网格加密	各向同性: 25 mm
尾流网格处理	各向同性: 40 mm
车底加密	Z 向加密: 5 mm; 边界层: 5 层, 总厚度 8 mm, 近壁面 1 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

右手定则设置旋转参考系的轴线方向, 使得旋转方向与赛车行驶方向相同, 此时在赛车的视角(即旋转系视角)下, 气流是从车头流向车尾的, 这与实际情况相符。同时地面设置与旋转系大小相等、方向相反、轴线相同的局部旋转速率, 轮胎设置局部旋转速率以模拟赛车车轮旋转和地面相对运动。

5.2. 仿真结果分析

在稳态回转工况下, 车辆的 $C_L \cdot A$ 为-4.90, 相比标准直线降低了 11.2%, $C_D \cdot A$ 为 1.72, 升阻比为 2.85, 后轴气动载荷占比为 52.85%。可以发现稳态绕环的工况对比偏航工况虽然负升力系数降幅较少, 但是由于阻力没有明显下降, 升阻比降幅已经与 12° 偏航工况相当。这表明稳态回转工况下的流态与偏航工况有明显区别。稳态绕环与 12° 偏航工况下的底面压力系数对比如图 16 所示。

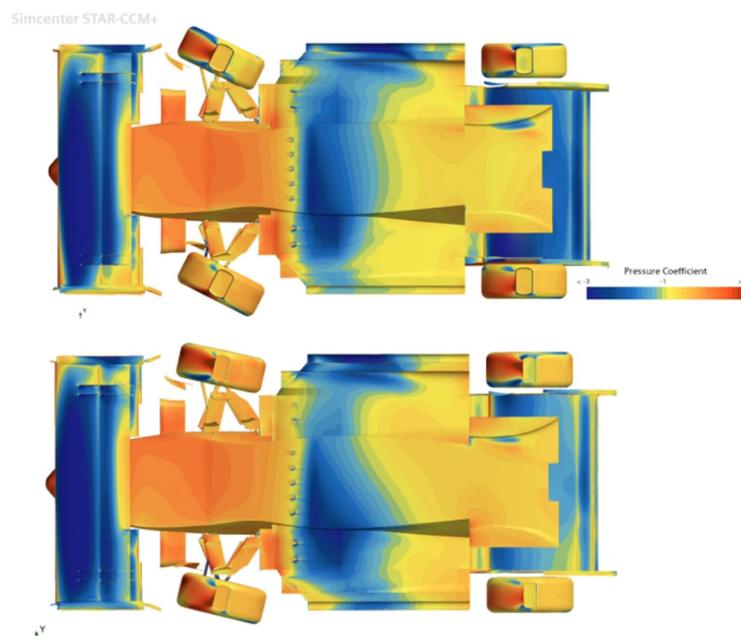


Figure 16. Comparison of pressure coefficients under steady-state circular motion (top) and 12° yaw angle (bottom)

图 16. 稳态绕环工况(上)与 12° 偏航(下)压力系数对比

在稳态绕环工况下,尾翼下表面压力明显低于偏航;底板扩散器朝向弯道内侧的部分低压区也较大,而外侧低压区面积较少;前翼的低压区面积小于偏航工况。这代表着在弯道中赛车的前翼受到更大的偏航角度影响,而侧扩底板和尾翼与旋转轴心的连线与车身轴线夹角更靠近垂直,偏航角度较小。所以在赛车设计过程中,对前翼偏航敏感性的考量更需要受到重视。

6. 结论与展望

本文结合山东大学 E17 赛车进行了俯仰、偏航和稳态绕环三个大类工况共五十余组 CFD 仿真,发现赛车在重刹俯冲、大角度偏航和高速转向等一些极端工况下空气动力学套件的气动特性相比直线工况可能发生明显的改变。这会导致赛车的动力学特性发生突变,给赛车的驾驶带来困难,甚至可能引发事故。所以对这些工况的仿真和改进设计是 FSAE 赛车设计和优化过程中必不可少的环节。

基于仿真结果,本文所研究的 FSAE 赛车在标准直线工况下具有较大的负升力和升阻比,俯仰时负升力变化较小且前后气动分配较平衡,在偏航和稳态绕环的弯道工况下负升力的降幅在可接受范围内。表明赛车具有较好的气动特性。但也注意到赛车在重刹俯冲的工况下可能出现前部负升力骤降的问题,且弯道中前部空气动力学套件偏航敏感度较高。这种特性可能导致赛车在激烈驾驶过程中产生动态特性的突变以及失控,需要在后续的优化工作中对前翼等敏感性较高的空气动力学部件做出有针对性的优化,必要时可以牺牲一部分直线工况下的负升力以换取更低的敏感性。

基金项目

季华实验室科研项目(X220011TN220)。

参考文献

- [1] 陈冀宁,王津宏,王小漫,等.基于长轴距构型的大学生方程式赛车空气动力学设计与研究[C]//中国汽车工程学会.2023 中国汽车工程学会年会论文集(8).2023: 104-110.
- [2] 何俊彪,姚勇,池奕承.基于 CFD 的大学生电动方程式赛车空气动力学套件设计与性能优化研究[C]//中国汽车工程学会,中国汽车工程学会汽车空气动力学分会.2025 中国汽车工程学会汽车空气动力学分会学术年会会议论文集.2025: 102-110.
- [3] Diasinos, S., Barber, T.J. and Doig, G. (2013) Influence of Wing Span on the Aerodynamics of Wings in Ground Effect. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, **227**, 569-573. <https://doi.org/10.1177/0954410011434884>
- [4] 梁德慧,刘哲恺,戚笑景,等.FSAE 赛车稳态转向工况外流场仿真的场函数方法[C]//中国汽车工程学会.2021 中国汽车工程学会年会论文集(8).2021: 285-290.
- [5] 赖晨光,刘丽华.基于不同横摆角的 FSC 赛车空气动力学研究[C]//中国汽车工程学会,中国汽车工程学会汽车空气动力学分会,中国汽车工程研究院股份有限公司.2021 中国汽车工程学会汽车空气动力学分会学术年会论文集.2021: 168-181.
- [6] 于志龙,刘曜齐,柴鉴容,等.基于重叠网格方法的高负升力大学生方程式赛车底部涡流的气动敏感性分析[C]//中国汽车工程学会.第三十一届中国汽车工程学会年会论文集(8).2024: 85-88.
- [7] 李亮.汽车动力学与控制[M].北京:清华大学出版社,2022.
- [8] Anderson, J.D. (2017) *Fundamentals of Aerodynamics*. 6th Edition, McGraw-Hill Education.
- [9] 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.