

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.04.004

大学生方程式赛车尾翼负升力特性有限元探究

严择圆, 杜常清, 胡艺凤, 王嘉鹏

(现代汽车零部件技术湖北省重点实验室 汽车零部件技术湖北省协同创新中心, 武汉 430070)

摘要:由空气动力学套件产生的负升力对提高大学生方程式赛车的赛道表现有着重要作用, 赛车尾翼是产生负升力的主要部件之一。使用有限元方法(computational fluid dynamics)对大学生方程式赛车尾翼的负升力特性进行研究。结果表明, 在一定范围内尾翼产生的负升力数值随主翼攻角的增大而增大; 大学生方程式整车流场中影响尾翼负升力的外界因素主要是车身遮挡物与前翼下游上升气流, 尾翼的最大负升力损失达到 40%; 对尾翼分区域设计不同主翼攻角值有效提升了赛车尾翼产生负升力的能力。

关键词:大学生方程式赛车; 空气动力学套件; 尾翼; 计算流体力学

中图分类号:TH122

文献标志码:A **文章编号:**1000-582X(2019)04-029-11

Study on aerodynamic performance of rear wing for Formula SAE racing cars based on finite element method

YAN Zeyuan, DU Changqing, HU Yifeng, WANG Jiapeng

(Hubei Province Key Laboratory of Modern Automotive Technology, Hubei Collaborative Innovation Center for Automotive Components Technology, Wuhan 430070, P.R.China)

Abstract: The negative lift generated by the aerodynamics package plays an important role in improving the track performance of the Formula One racing. The rear wing is one of the main components that generate negative lift. In this paper, Computational Fluid Dynamics (CFD) technology is used to study the aerodynamic characteristics of the rear wing of formula racing car for college students. The results show that the value of negative lift generated by the empennage increases with the increase of the angle of attack of the main wing in a certain range. The external factors affecting the negative lift of the tail in the Formula SAE vehicle flow field are mainly the body blockage and the upstream airflow of the front wing. The maximum negative lift loss is about 40%; designing different main wing angles of attack for the tail sub-region can effectively improve the ability of the Formula SAE tail to produce negative lift.

Keywords: Formula FSAE; aerodynamic package; rear wing; CFD

中国大学生方程式赛事(Formula SAE, 简称 FSAE)从 2010 年开始举办, 随着赛车的底盘与动力等技术的发展日趋稳定, 空气动力学成为 FSAE 赛车设计的重要环节, 并密切影响着赛车的动力性、经济性与操控

收稿日期:2018-11-03

基金项目:国家级大学生创新创业训练计划项目(20181049707008)。

Supported by Students Innovation and Entrepreneurship Training Program(20181049707008).

作者简介:严择圆(1997-), 男, 武汉理工大学本科生, 主要研究方向为汽车空气动力学, (E-mail)2251385893@whut.edu.cn。

通讯作者:杜常清, 男, 武汉理工大学教授, 博士生导师, (E-mail)cq_du@whut.edu.cn。

稳定性。基于弯道多、转弯半径小、平均速度约为 50 km/h 的赛道特点, FSAE 赛车空气动力学套件开发的主要目的是在低速时产生尽可能多的负升力, 提高轮胎侧偏刚度与侧向加速度以提高弯道极限^[1]。尾翼是安装在赛车后部的空气动力学部件之一, 是重要的负升力来源, 其产生的负升力约占整车空气动力学套件的 35% 左右^[2]。文献[3]论证了 CFD 技术在该赛事运用的优异性, 并为赛车设计了全套空气动力学套件, 提升了其性能; 文献[4]对赛车进行了圈速仿真, 表明下压力可以显著提升赛车的弯道极限; 文献[5]对 FSAE 赛车尾翼气动性能进行了研究; 文献[6]对比分析了翼面造型对前翼尾翼性能的影响。从目前国内外的研究来看, 对 FSAE 赛车空气动力学分部件及其组合性能的研究较多, 而对各气动部件在整车流场中受到的影响、变化规律以及相应的优化方式研究较少。

针对上述问题, 笔者利用有限元方法(CFD)分析影响大学生方程式赛车尾翼负升力的内部和外部因素, 探究并总结出提高赛车尾翼负升力效率的有效方法。

1 计算模型

1.1 整车计算域及网格划分

选取 FSAE 赛事中典型的赛车外观并利用三维建模软件 CATIA 建立了赛车的三维模型, 省略了车辆悬架杆件, 简化了车辆侧箱、座舱内部细节和车轮, 以便于网格划分和流场计算; 建立流场计算域, 车辆前部距离流场入口为车长的 3 倍, 尾部距离出口为车长的 7 倍, 计算域高度为车高的 5 倍, 宽度为半车宽的 5 倍, 同时考虑到模型具有对称面, 取整车模型的半边以减小计算量^[7], 如图 1 所示。

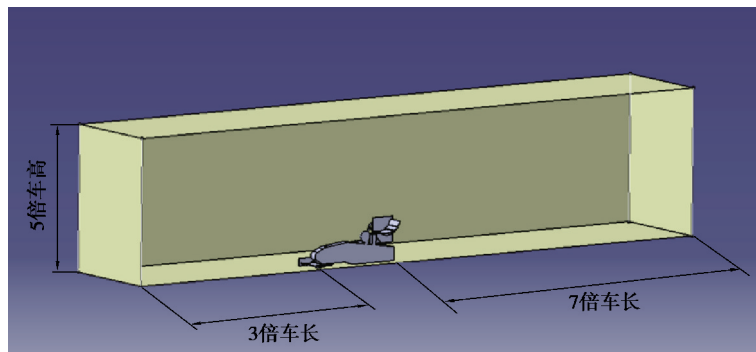


图 1 整车半边模型及计算域模型

Fig. 1 Vehicle half-side model and calculation domain model

利用 ICEMCFD 网格划分软件, 采用 Robust(Octree)方法进行四面体非结构网格的划分; 对车辆附近的体网格, 以及各翼片前缘、后缘和车身表面复杂曲面进行加密, 同时全局网格基于曲率和近似度加密; 在流体计算软件 Fluent 中将四面体网格转换为多面体网格以节省计算资源。

网格划分结果如图 2 所示, 网格节点总数为 754 082, 单元总数为 3 037 990。

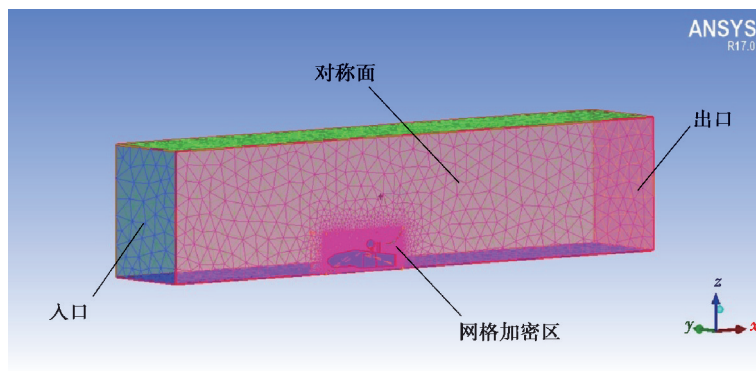


图 2 计算域整体网格划分

Fig. 2 Computing domain overall meshing

1.2 控制方程与湍流模型

1.2.1 控制方程

大学生方程式赛车流场的仿真属于求解湍流流动的问题,马赫数 <0.3 ,首先给出适用于任何复杂湍流流动的流体运动的控制方程即 N-S 方程。

连续方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

动量方程

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial p'}{\partial x_i}, \quad (2)$$

式中: u_i, u_j 为速度张量; ρ 为空气密度; p' 为修正压力;有效粘度系数 $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$ 。

1.2.2 湍流模型

需要附加湍流方程对式(1)(2)进行求解,考虑到赛车车身空套的壁面高应变率和大程度的流线弯曲,为尽可能详细地模拟赛车周围流场细节,选取 Realizable k - ϵ 模型,该模型被证明在车辆外流场仿真中能给出相对精确的结果。

湍动能方程 k

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon, \quad (3)$$

湍动能耗散方程 ϵ

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} C_k - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon), \quad (4)$$

式中: μ 为层流粘性系数; μ_t 为湍流粘性系数,且 $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \epsilon$; $C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}, \sigma_k, \sigma_\epsilon$ 均为经验常数,软件中的取值分别为 1.44, 1.92, 1.00 和 1.30; G_k 为由层流速度梯度产生的湍流动能^[8]。

1.3 参数设置

流场计算域入口设置为速度入口(velocity inlet),流速 $u = 20$ m/s;出口设置为压力出口;地面设置为滑移壁面,滑移速度为 20 m/s,方向与流速方向相同;采用压力基求解器,空气温度 $T = 288$ K,静压 $p_0 = 101.325$ kPa,空气密度 $\rho = 1.225$ kg/m³,运动黏度 $\nu = 1.4607 \times 10^{-5}$ m²/s;求解方法为压力耦合方程组的半隐式方法,压力离散格式为 standard,动量、湍流强度、湍流耗散率的离散格式为 2 阶迎风^[9]。

1.4 大学生方程式赛车三维模型

尾翼,又称后定风翼,是安装于赛车后部的具有翼片作用特性的气动特征部件,作用为在赛车后部产生下压力并提供一定俯仰力矩,通常由翼片和端板 2 种基本结构组成,如图 3、4 所示。

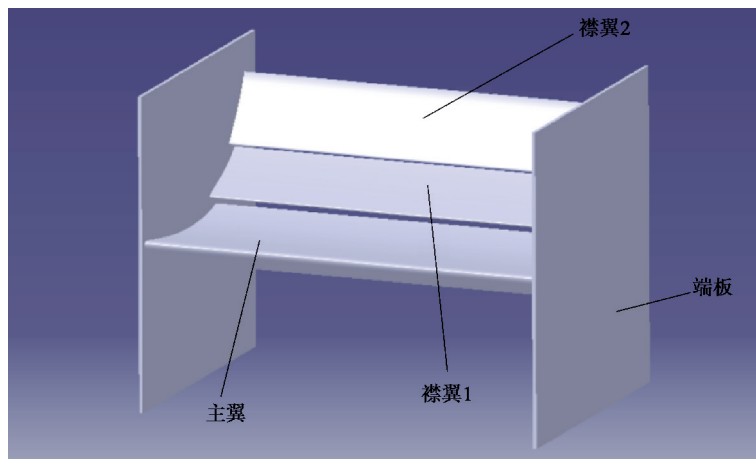


图 3 尾翼结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the tail structure

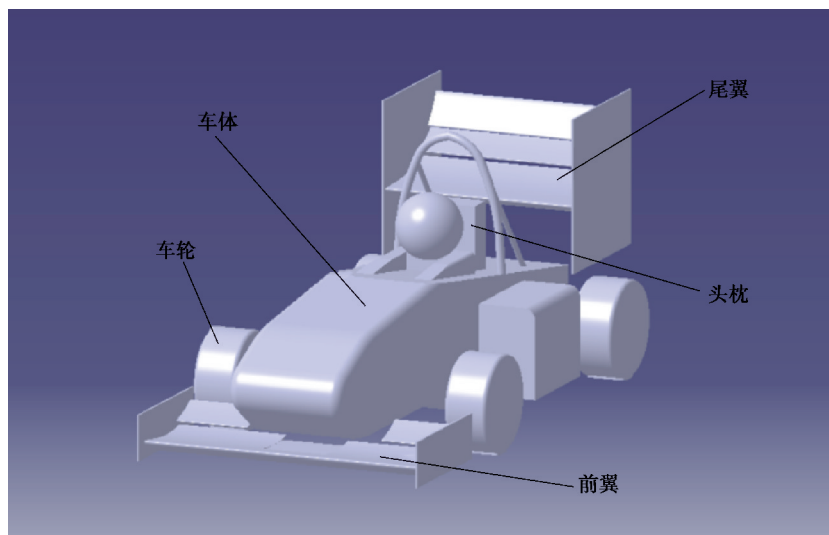


图 4 整车简化计算模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the simplified vehicle calculation model

笔者采用尾翼模型为赛事中常见的三翼片布置形式^[10],具体参数如图 5、6 和表 1 所示。

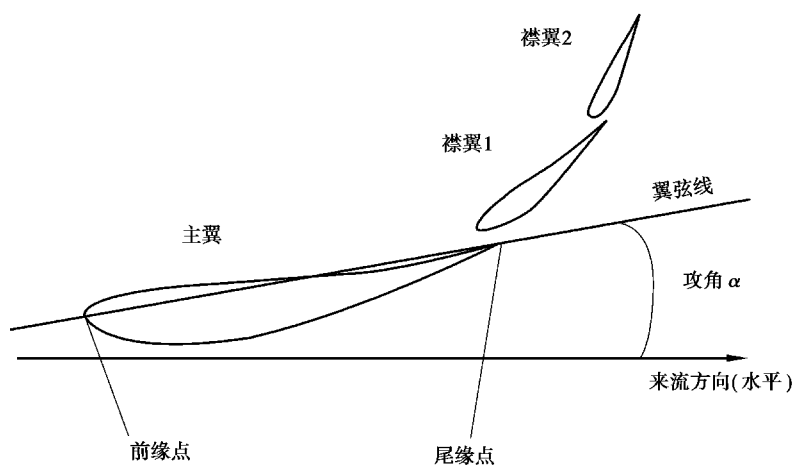


图 5 尾翼结构布置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the tail structure

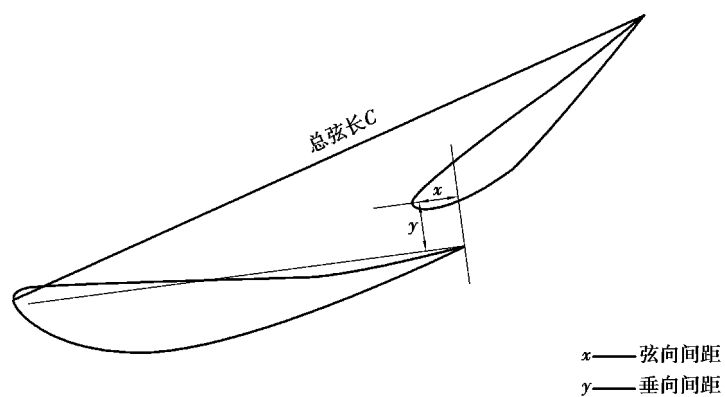


图 6 组合翼片缝道参数示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the combined airfoil seam parameters

表 1 尾翼结构参数

Table 1 Tail structure parameters

结 构	参 数
主翼	弦长 400 mm,翼型 CH10
襟翼 1	弦长 120 mm,翼型 S1223
襟翼 2	弦长 100 mm,翼型 S1223
襟翼 1 攻角	30°
襟翼 2 攻角	60°
翼间间隙	弦向与垂向均 5%总弦长 c
端板长度	650 mm
端板高度	700 mm

2 尾翼的负升力特性

在所有翼片均不发生失速的情况下,进行尾翼主翼攻角单一变量的调整,对比其在单件状态和整车状态中对尾翼负升力数值的影响,结果如图 7 所示(单件状态即仅保留三维尾翼实体,并保持与整车相同的在计算域中的相对位置)。

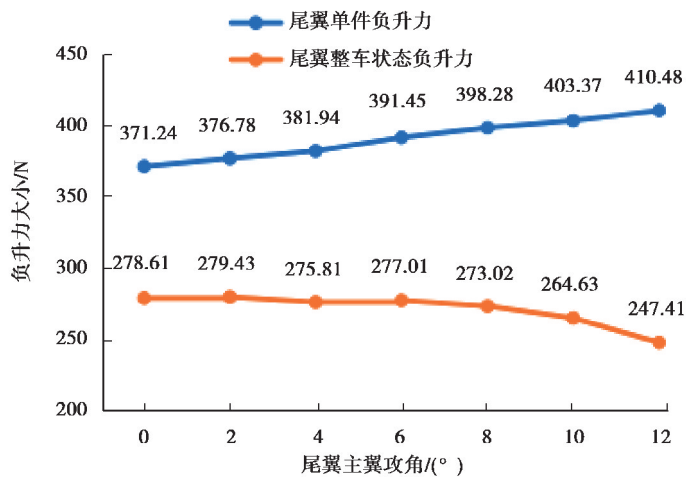


图 7 尾翼负升力特性随主翼攻角变化情况

Fig. 7 The negative lift characteristics with the angle of attack of the main wing

用式(5)来描述尾翼整车状态下负升力特性与单件状态负升力特性的关系:

$$F_r = F_{r0} \times \eta, \tag{5}$$

式中: F_r 为整车状态下尾翼负升力, F_{r0} 为单件状态下尾翼负升力;定义 η 为尾翼剩余负升力系数, η 值越大,则整车状态下尾翼负升力损失越小,负升力产生效率越高。图 8 给出了尾翼主翼攻角在 $0^\circ \sim 12^\circ$ 变化区间内相应的剩余负升力系数值及变化趋势。

由以上可知,单件状态下尾翼负升力随主翼攻角的变化近似是线性的^[11],而在整车状态下变化趋势不再满足线性,并且相较于单件状态,在整车状态时负升力下降明显,仅为单件状态下的 $60\% \sim 75\%$,造成这些

差异的原因是整车流场中,尾翼受到了赛车其他部件的影响,并且在不同的尾翼主翼攻角下,尾翼受到影响的程度是不同的。

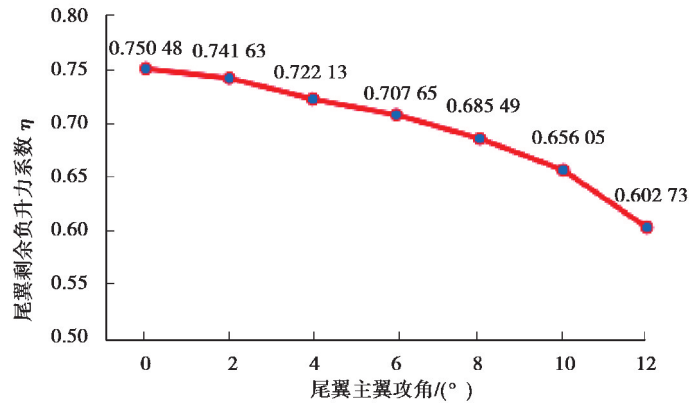


图 8 尾翼主翼攻角 0° ~ 12° 区间剩余负升力系数变化趋势

Fig. 8 Trend of residual negative lift coefficient in the range of 0° to 12° angle of attack of the main wing of the tail

定义:

$$\eta = \eta_1 \times \eta_2, \quad (6)$$

η_1 记作受遮挡剩余负升力系数, η_2 记作受前翼影响剩余负升力系数, 有:

$$\eta_1 = \frac{\text{仅在车身影响下的尾翼负升力数值}}{\text{尾翼单件状态负升力数值}}, \quad (7)$$

$$\eta_2 = \frac{\text{前翼和车身共同影响下的尾翼负升力数值}}{\text{仅在车身影响下的尾翼负升力数值}}. \quad (8)$$

由此计算得到尾翼的受遮挡剩余负升力系数 η_1 数值及其随主翼攻角的变化趋势如表 2 所示。

表 2 主翼攻角 0° ~ 12° 区间尾翼受遮挡负升力与剩余负升力系数
Table 2 Absorbing negative lift and remaining negative lift coefficient of the tail of the main wing angle of attack from 0° to 12°

尾翼主翼攻角/(°)	尾翼负升力/N	受遮挡剩余负升力系数 η_1
0	290.02	0.781 22
2	292.14	0.775 36
4	289.17	0.757 11
6	284.72	0.727 34
8	281.34	0.706 38
10	267.80	0.663 91
12	244.81	0.596 39

车身的存在遮挡了尾翼,对尾翼造成相应影响,同时还会对前翼的下游气流造成干扰,因此系数 η_2 的定义中包含了车身遮挡的部分,以使前翼对尾翼的影响情况更接近实际,故受前翼影响剩余负升力系数 η_2 需要由 η 和 η_1 共同导出,具体结果如表 3~5 所示。

表 3 前翼襟翼 15°~35°区间两种尾翼设置下的负升力情况

Table 3 Negative lift conditions of the two types of tail fins in the 15° to 35° range of the front wing flaps

前翼襟翼攻角/(°)	0°主翼尾翼负升力/N	10°主翼尾翼负升力/N
15	282.38	266.91
20	279.78	264.37
25	279.28	264.11
30	278.95	263.05
35	273.70	261.83

表 4 0°尾翼主翼攻角时系数 η_2 与前翼襟翼角度变化关系Table 4 Relationship between the coefficient η_2 and the angle of the front wing flap at the angle of attack of the main wing of 0° tail

前翼襟翼攻角/(°)	剩余负升力系数 η	受遮挡剩余负升力系数 η_1	受前翼影响剩余负升力系数 η_2
15	0.760 64		0.973 65
20	0.753 64		0.964 69
25	0.752 29	0.781 22	0.962 96
30	0.751 40		0.961 82
35	0.737 26		0.943 72

表 5 10°尾翼主翼攻角时系数 η_2 与前翼襟翼角度变化关系Table 5 Relationship between the coefficient η_2 and the angle of the front wing flap during the attack angle of the main wing of the 10° tail

前翼襟翼攻角/(°)	剩余负升力系数 η	受遮挡剩余负升力系数 η_1	受前翼影响剩余负升力系数 η_2
15	0.661 70		0.996 67
20	0.655 41		0.987 19
25	0.654 75	0.663 91	0.986 20
30	0.652 13		0.982 26
35	0.649 11		0.977 71

保持前翼参数不变,前翼襟翼攻角设为 30°,选取尾翼主翼攻角 0°~12°范围进行仿真,受前翼影响剩余负升力系数 η_2 变化趋势如图 9 所示。

由以上结果可知,2 个系数随尾翼主翼攻角的变化趋势近似是相反的,而两者的乘积即尾翼剩余负升力系数 η 总体上随着尾翼主翼攻角的增大而减小。

气流在绕过头枕、头盔等特征时会在其后方形成分离涡(如图 10),该部分涡流在一定区域内低速自旋,其位置通常正好位于尾翼翼片下方,分离涡对翼片下表面负压造成扰动并使负压减小,从而使尾翼损失负升力^[12];将该部分影响归纳为分离涡引起的尾翼面负压区的破坏。前翼和车身的干扰使气流在其下游形成升流^[13],这部分到达尾翼的气流相比远处的直匀流有了一定的角度,从而使尾翼翼片的等效攻角减小^[14](如图 11),绕翼环量值发生变化,尾翼产生负升力的能力降低;将该部分影响归纳为上升气流引起的尾翼实际攻角降低。尾翼的负升力特性是二者共同作用的结果。

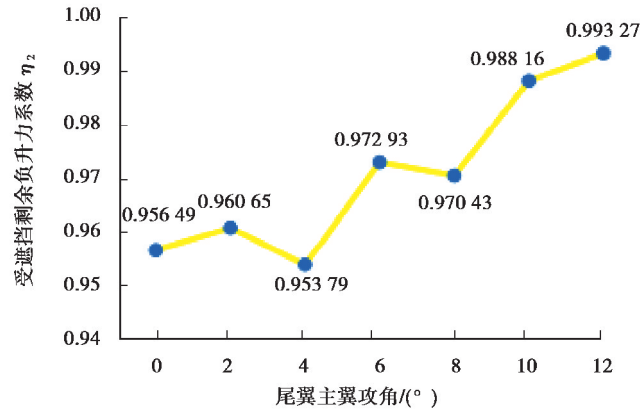


图 9 30°前翼襟翼设置下尾翼攻角 0°~12°区间系数 η_2 变化趋势

Fig. 9 30° front wing flap setting under the angle of attack angle η_2 of the tail angle of 0° to 12°

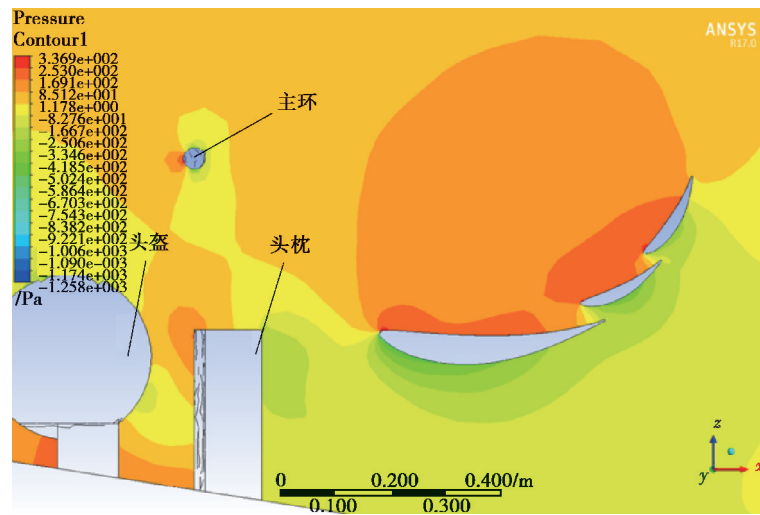


图 10 头枕、头盔等遮挡物对尾翼的影响压力云图

Fig. 10 Pressure shadow of the impact of the headrest, helmet and other coverings

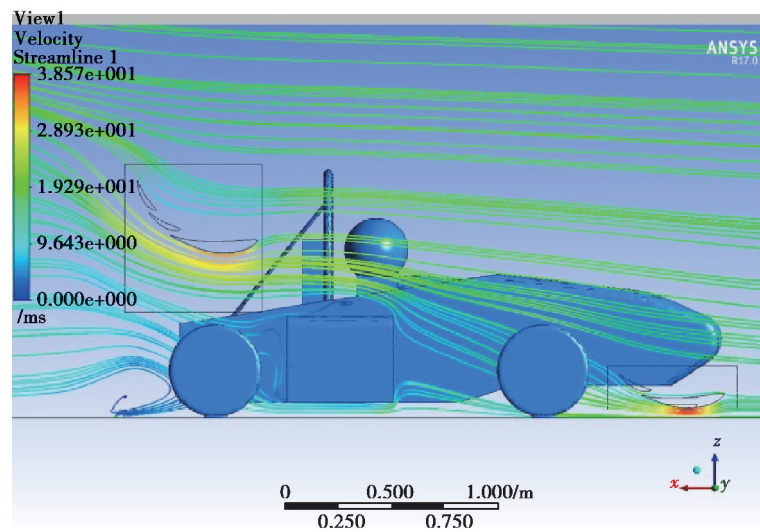


图 11 赛车前部升流对尾翼的影响流线图

Fig. 11 Flow chart of the influence of the front lift of the car on the tail

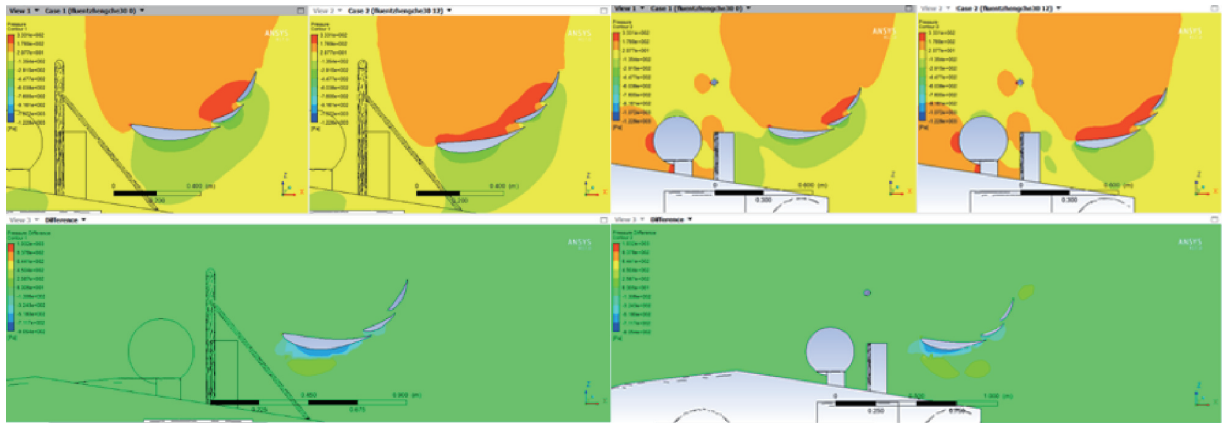
表 6 主翼攻角 0°~12°区间尾翼迎风面积(X 方向)

Table 6 Main wing angle of attack 0° to 12° interval tail windward area (X direction)

尾翼主翼攻角/(°)	0	2	4	6	8	10	12
尾翼迎风面积(X 方向)/m ²	0.268	0.270	0.274	0.286	0.294	0.302	0.310

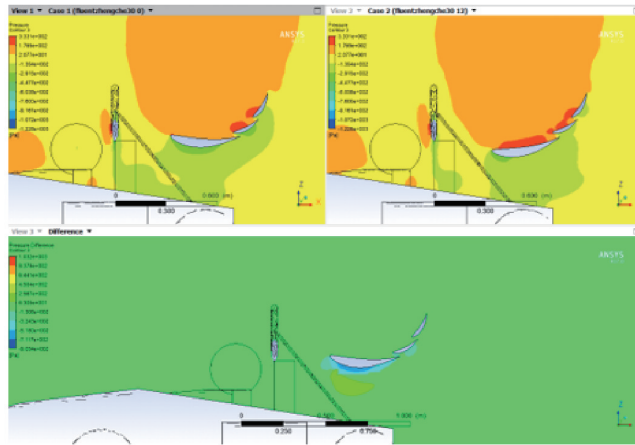
由表 7 数据可知,随着尾翼主翼攻角的增大,尾翼的迎风面积增加,但受限于规则尾翼最高点始终需要与地面保持 1 200 mm 的距离,因此主翼片将更加靠近头枕等遮挡部件的气流分离区,尾翼的负升力损失增加,故 η_1 值随尾翼主翼攻角增大而减小;前翼襟翼攻角的增大使其下游气流上升趋势更加显著,从而使尾翼翼片的等效攻角减小,产生负升力的能力因此下降,增大尾翼主翼的攻角即增大了等效攻角,因此尾翼产生负升力的能力重新得到提升,故 η_2 值随主翼攻角增大而增大。

对比如图 12 所示的尾翼翼展方向不同位置的压力云图可以发现,尾翼外端未被前方车体部件遮挡的分段其上下表面压差随尾翼主翼攻角的增大而增大,即产生负升力的能力得到增强;而在被遮挡的中间分段则呈现出相反的趋势,产生负升力的能力被削弱^[15]。



(a) Y=0.40 m 平面尾翼压力云图及 0° 与 12° 主翼攻角对比

(b) Y=0.25 m 平面尾翼压力云图及 0° 与 12° 主翼攻角对比



(c) Y=0.00 m 平面尾翼压力云图及 0° 与 12° 主翼攻角对比

图 12 尾翼翼展向不同位置压力云图对比情况

Fig. 12 Comparison of pressure cloud maps of different wings at different positions

3 整车状态下尾翼负升力的提升方法

在不同的分段内对不同的影响方式作出相应的优化,如图 13 所示,将尾翼按翼展向分作 3 段,对于翼展中段,减小翼片攻角以适应受遮挡剩余负升力系数的变化规律;对于外侧段调大攻角以适应受前翼影响剩余负升力系数的变化规律,不同分段之间增加隔板加以分割和连接。

表 7 给出了 0° 主翼尾翼、 12° 主翼尾翼和分段式尾翼 3 种方案在单件状态和整车状态下的负升力以及在整车中的剩余负升力系数。由表 8 数据可知,分段处理增强了应对相应干扰的针对性,在总体系数上得到了提升。

表 7 分段式尾翼与常规尾翼负升力特性对比

Table 7 Comparison of negative lift characteristics between segmented tail and conventional tail

尾翼类型	单件状态负升力/N	整车状态负升力/N	剩余负升力系数 η
0° 主翼尾翼	371.24	278.61	0.750 48
12° 主翼尾翼	410.48	247.41	0.602 73
分段式尾翼	370.78	281.12	0.763 58

将隔板拆除,保留现有分段参数并以平滑曲面过渡连接,得到如图 14 的多截面曲面主翼式尾翼方案,在表 8 中给出了该方案与上述 3 种尾翼方案的负升力特性对比。

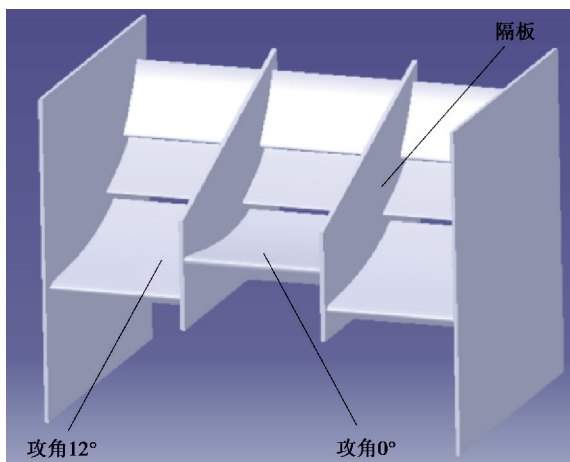


图 13 带隔板的分段式尾翼设计示意图

Fig. 13 Schematic diagram of the segmented tail design with partition

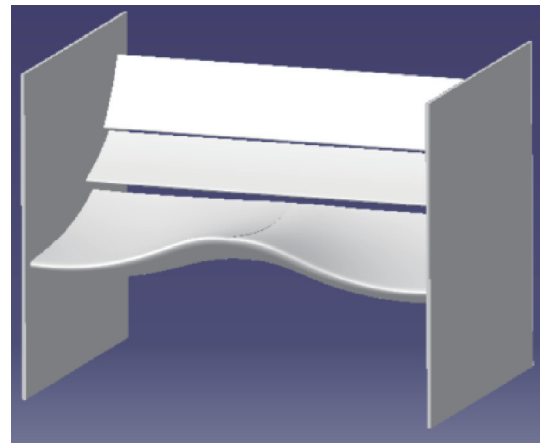


图 14 多截面曲面主翼式尾翼设计示意图

Fig. 14 Schematic diagram of multi-section curved main wing tail design

表 8 多截面曲面主翼式尾翼负升力特性

Table 8 Negative lift characteristics of main wing tail of multi-section curved surface

单件状态负升力/N	整车状态负升力/N	剩余负升力系数 η
377.78	289.36	0.765 95

在本案例中,尽管分段式尾翼和多截面主翼式尾翼在单件负升力和整车负升力绝对数值上较常规方案并没有突破,但在适应整车状态下各种干扰因素的能力明显优于常规尾翼;在 FSAE 赛车中尾翼前方的各种干扰是不可避免的,现实中的赛车对尾翼的干扰因素更是远多于简化的仿真模型,因此提升优化尾翼在整车状态中的效率比提高单件状态的负升力数值更有意义。

4 结 论

1) 尾翼在整车流场中的负升力特性不同于单件状态下的特性,单一的增大主翼攻角以增大尾翼所产生负升力的方法在整车状态下不适用。

2) 在整车状态时车身遮挡和前翼下游气流对尾翼负升力的影响均与尾翼主翼攻角近似呈线性关系,但变化趋势相反。

3)针对不同干扰,通过分段优化得到的分段式尾翼和多截面曲面尾翼是提升尾翼在整车状态中负升力产生效率的较优方案。

参考文献:

- [1] 潘小卫. 赛车 CFD 仿真及风洞试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
PAN Xiaowei. Analysis and optimization of some racing car on aerodynamic characteristics [D]. Changsha: Hunan University, 2009.(in Chinese)
- [2] 柏秋阳, 王辉, 李嘉凡, 等. FSAE 赛车空气动力学套件组合设计分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2016, 39(5): 592-597,676.
BAI Qiuyang, WANG Hui, LI Jiafan, et al. Combinational design and analysis of aerodynamics devices of FSAE racing car[J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 2016, 39(5): 592-597,676.(in Chinese)
- [3] 张璇. 基于 CFD 技术的 FSC 赛车外流场分析及优化[D]. 锦州: 辽宁工业大学, 2017.
ZHANG Xuan. Analyze and optimize FSC racing outflow field based on CFD [D]. Jinzhou: Liaoning University of Technology, 2017.(in Chinese)
- [4] 孙文. 基于 CFD 的低速赛车前后翼设计[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
SUN Wen. The design of low-speed racecar inverted wings based on CFD [D]. Changsha: Hunan University, 2016. (in Chinese)
- [5] 俞凯南, 谢世滨. 基于 CFD 的 FSAE 赛车尾翼设计及优化研究[J]. 机电工程, 2018, 35(1): 16-21.
YU Kainan, XIE Shibin. Raer wing design and optimization for formula sae car based on CFD[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018, 35(1): 16-21.(in Chinese)
- [6] 周涛, 曾忠. FSAE 赛车新型曲面前翼尾翼气动优化设计[J]. 重庆大学学报:2017,40(10):40-52.
Zhou Tao, Zeng Zhong. Optimal aerodynamic design for formula SAE car using curved wings[J].Journal of Chongqing University,2017,40(10):40-52
- [7] 周涛. 基于 CFD 的大学生方程式赛车空气动力学套件设计[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
ZHOU Tao. Aerodynamics kits design for formula SAE race car based on CFD [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.(in Chinese)
- [8] Hetawal S, Gophane M, Ajay B K, et al. Aerodynamic study of formula SAE car[J]. Procedia Engineering, 2014, 97: 1198-1207.
- [9] Soliman A, Martins M, Schommer A. Formula SAE Aerodynamics: Design process with focus on drivability[J/OL]. SAE International,2015:2015-36-0359.(2015-09-22).[2018-10-12].<https://doi.org/10.4271/2015-36-0359>.
- [10] 毛旭, 吴宁宁. FSAE 赛车新型定风翼型气动性能的提升[J]. 机械科学与技术, 2014, 33(9): 1397-1402.
MAO Xu, WU Ningning. Aerodynamic performance improvement of a new type wing for formula SAE car[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2014, 33(9): 1397-1402.(in Chinese)
- [11] Mcbeath S. Competition car aerodynamics 3rd edition[M]. Dorset:Veloce Publishing Ltd, 2015.
- [12] 朱发旺. FSC 赛车车身空气动力学特性分析研究[D]. 太原: 中北大学, 2017.
ZHU Fawang. Aerodynamics characteristics analysis on FSC racing car [D]. Taiyuan: North University of China, 2017. (in Chinese)
- [13] Gabbasa A, Arslan S, Jawad B, et al. Aerodynamic shape optimization for a 3-D multi-element airfoil[J/OL]. SAE International, 2014: 2014-01-0296. (2014-04-01)[2018-10-31].<https://doi.org/10.4271/2014-01-0296>.
- [14] Zhang Y, Yang C, Wang Q, et al. Aerodynamics of Open Wheel Racing Car in Pitching Position[J/OL]. SAE International,2018: 2018-01-0729.(2018-04-03)[2018-10-06].<https://doi.org/10.4271/2018-01-0729>.
- [15] Anderson J D Jr. Fundamentals of aerodynamics[M]. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2009.