

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2017.10.005

FSAE 赛车新型曲面前翼尾翼气动优化设计

周 涛, 曾 忠

(重庆大学 航空航天学院 工程力学系, 重庆 400044)

摘 要:通过优化设计大学生方程式赛车的空气动力学套件,可有效提高赛车的性能。在满足大学生方程式汽车大赛(FSAE)设计规则的前提下,率先采用曲面翼设计理念,优化设计了重庆大学方程式赛车的前翼和尾翼。结合翼形分析软件 Profili 与 Xfoil,进行详细的翼型选型与攻角确定。基于计算流体力学的三维流场数值模拟,优化了赛车的前翼和尾翼。对比多种造型策略,确定了新型减阻曲面翼造型,选用“直主翘襟”尾翼和箭状曲面前翼的空气动力学套件。优化后的赛车整车负升力系数提升至 1.68,负升阻比提升至 1.91。

关键词:FSAE;翼型;曲面翼;负升力系数;阻力系数;CFD 数值仿真

中图分类号:U462;O355

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2017)10-040-13

Optimal aerodynamic design for formula SAE car using curved wings

ZHOU Tao, ZENG Zhong

(College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R.China)

Abstract: Optimizing the design of the aerodynamic packages can effectively improve the performance of the formula SAE (FSAE) racing car. Following the rules of Formula Student China, we take the lead in using the curved wings to optimize the front wing and rear wing for Chongqing University formula SAE racing car. Profili and Xfoil are used to choose the wing sections and optimize the attack angles. An in-depth study is undertaken to analyze the flow field around the formula car in the rectangular parallelepiped wind tunnel simulation via numerical simulations (CFD, computational fluid dynamics). The results indicate that downforce is increased with a sword cured front wing and a rear wing. The rear wing contains a main straight wing and upwarp flap. The downforce coefficient is improved to 1.68 and downforce-drag ratio is improved to 1.91.

Keywords: FSAE; aerodynamics; wing section; curved wing; CFD; downforce; drag coefficient

近年来,大学生方程式汽车大赛(formula SAE,简称 FSAE)以其设计开放性和原创性,得以在世界范围内迅速发展^[1]。计算流体力学(CFD)使得各高校车队深入研究赛车的空气动力学成为可能,同时风洞技术、数值模拟技术不断融入到赛车的开发过程中^[2-3]。空气动力学套件能极大地提升赛车的弯道极限并增强操控稳定性,其中负升力系数和气动阻力系数是衡量赛车空气动力学套件的关键参数。纵观国内外高校车队,2013 年关东大学的 Tetsuya Fujimoto 详细阐述了加装前翼尾翼能大幅提升赛车的圈速^[4],2013 年查尔姆斯理工大学的 Sven Rehnberg 对比分析了 FSAE 赛车多种直翼面造型的前翼和尾翼^[5],而 2015 年长安大学陆雄文详细分析了加装空气动力学套件的赛车流场^[6]。但高校车队的空气动力学套件多采取直翼面设计,赛

收稿日期:2017-05-05

作者简介:周涛(1992—),男,硕士,主要研究方向为赛车空气动力学,(E-mail)1010050904@qq.com。

车下压力难以进一步提升,流场优化存在不足。笔者在重庆大学 2015 年赛车的直翼面基础上率先采取曲面翼优化设计,采用人工修型与局部优化相结合的方法,对比多种造型策略并选取最优的前翼和尾翼设计,增大了整车的下压力。

1 赛车空气动力学特性

1.1 空气动力学套件特性

据统计,赛车大约 80% 的抓地力是由下压力提供的,剩余 20% 由轮胎提供。赛车空气动力学套件能极大地增加下压力、增大轮胎抓地力,提高赛车的过弯速度并增强刹车稳定性。赛车前翼、尾翼分别提供 25%, 35% 左右的下压力,总计 60% 左右^[7]。且前翼尾翼的相对位置决定整车气动中心的位置,因此赛车前翼和尾翼的合理设计对整车性能尤为重要。尾翼常见于家用车的改装,而红牛 F1 车队工程师 Adrian Newey 在 2016 年阿斯顿马丁 AM-RB-001 概念超跑中率先引入量产车的前翼设计。

1.2 理论基础与控制方程

根据以往赛季的数据,直线加速、八字绕环、高速避障和耐久赛这四项动态赛的赛车常用时速为 20 m/s (72 km/h) 左右,因此 FSAE 赛车流场为低雷诺数下的三维、等温、不可压粘性流动,故采用适合大多数工程湍流问题的 $k-\epsilon$ 模型^[8-9]。

首先给出控制方程如下,

连续方程

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

动量方程

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

式中:修正压力 p' ,有效粘度系数 μ_{eff} 为 $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$ 。

$k-\epsilon$ 模型的湍动能和湍动能耗散方程分别为,

湍动能方程 k

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

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,湍流常数 $C_\mu = 0.09, C_{\epsilon 1} = 1.44, C_{\epsilon 2} = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$ 为经验常数^[10]; μ_t 为湍流粘性系数,且 $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$; G_k 为由层流速度梯度产生的湍流动能, $G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ 。

2 前翼尾翼设计及 CFD 建模

2.1 翼型选型及攻角优化

根据车速 72 km/h 设计翼型弦长为 300 mm,计算雷诺数为 400 000,从 Profili 翼型库中分组对比 2 202 种翼型并最终挑选出低速高升力翼型,为 Wortmann FX 74-CL5-140 Modified 与 S1210 12% 翼型。利用 Profili 软件计算出相同雷诺数下,2 种翼型升力系数 C_L 、阻力系数 C_D 分别随攻角 α 变化的曲线图,如图 1 所示。

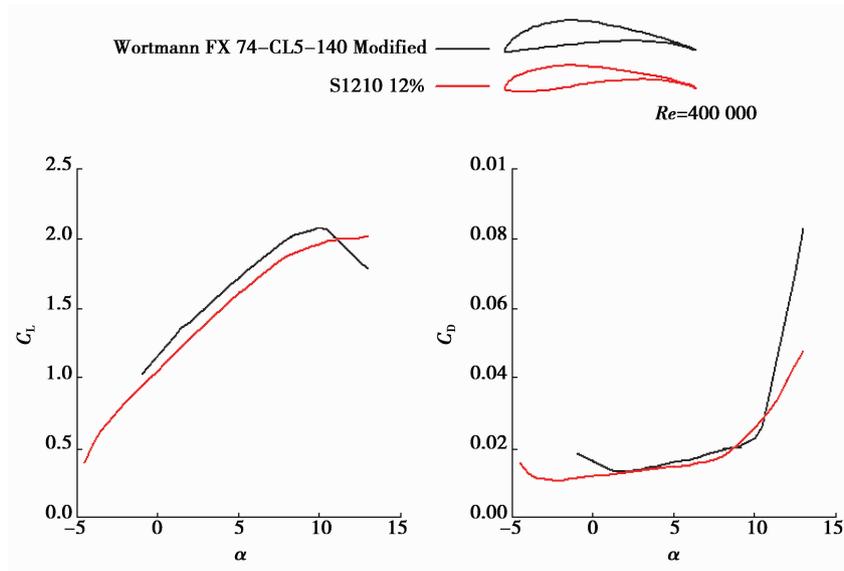


图 1 翼型升、阻力系数随攻角变化

Fig.1 The relationship between down force coefficient and angle of wing section

考虑到低速状态下 Profili 只能计算 $-5^{\circ} \sim 13^{\circ}$ 的翼型攻角,对翼型大攻角乃至失速的情况,则采用 Xfoil 自行编程运算,结果如图 2 所示。图 2(a)为 Wortmann FX 74-CL5-140 Modified 翼型升力系数 C_L 和力矩系数 C_M 随攻角 α 的变化图,此翼型可积分计算到 27° 攻角。图 2(b)为 S1210 12%翼型升力系数 C_L 和力矩系数 C_M 随攻角 α 的变化图,此翼型可积分计算到 19° 攻角。

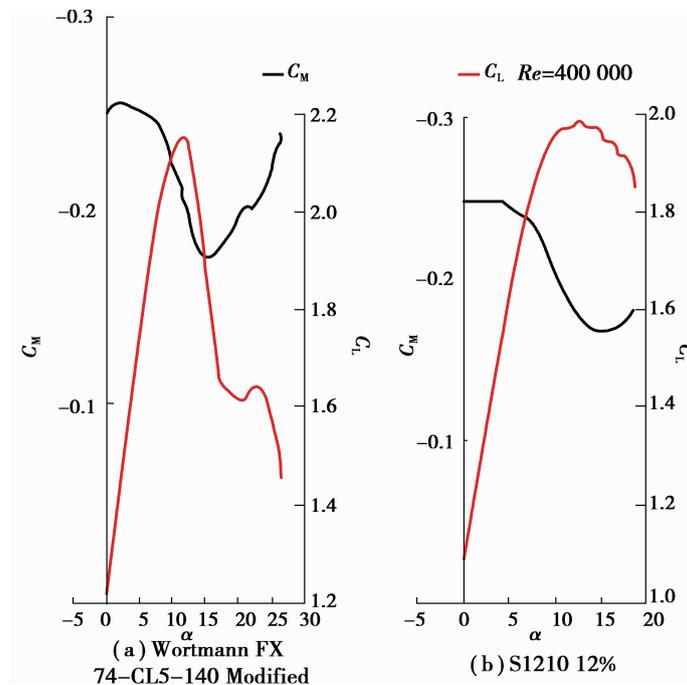


图 2 升力系数、力矩系数随攻角变化

Fig.2 Comparing of two wing sections at large angle

详细对比计算数据后,优选升力系数较大的翼型并综合考虑升阻比与失速临界,赛车前翼和尾翼的主翼均选择 Wortmann FX 74-CL5-140 Modified 翼型,襟翼选择 S1210 12%翼型。主翼翼型攻角 8° , C_L 为 1.990 5, C_D 为 0.019 3, C_L/C_D 为 103.1。襟翼翼型攻角 13° (相对来流), C_L 为 2.014 0, C_D 为 0.047 6, C_L/C_D 为 42.3。

2.2 翼型空间布置优化

赛车负升力翼为翻转的翼型组合而成,此时翼面提供负升力,即下压力。来流经过主翼后角度会改变,需对襟翼攻角与空间位置进行详细分析。为便于分析,以主翼后缘为原点,建立如图 3 所示坐标系。设计主翼弦长 300 mm,襟翼弦长 250 mm,主翼襟翼布置如图 3 所示,选取水平位置 x 与高度 y 为坐标轴,单位为 mm。主翼攻角 β 为 8° ,襟翼攻角 θ 为与水平轴 y 的夹角。

首先计算并确定襟翼攻角 θ 。因被主翼扰流,水平来流经过主翼后角度增大 β ,重点计算襟翼角度 θ 为 21° (襟翼相对来流角度约为 13°)附近的升阻力系数。基于计算流体动力学二维数值模拟,得到襟翼攻角 θ 从 5° 至 31° 变化时襟翼升力系数和阻力系数分布图,如图 4 所示。笔者选取组合襟翼攻角 θ 为 21° (相对来流角度为 13°),升力系数和阻力系数分别为 -2.443 和 0.112 。

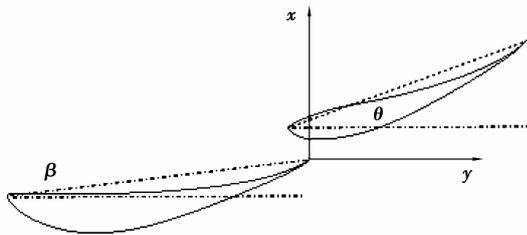


图 3 组合翼型空间位置示意
Fig.3 The coordinate of joined-wing

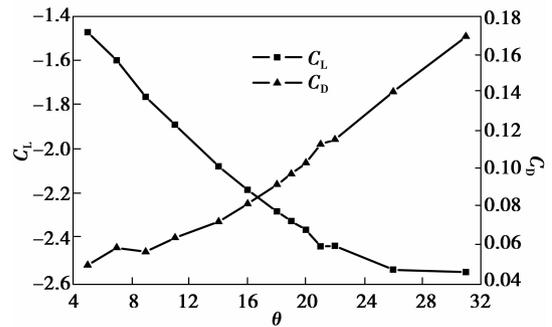


图 4 襟翼负升力系数与阻力系数随攻角 θ 变化
Fig.4 The relationship between C_L/C_D and angle of wing section

赛车前翼和尾翼均为组合翼,主翼与襟翼空间的相对位置直接影响其组合效果。分析组合效果时对图 3 坐标系中相对水平位置 x 与高度 y 分两步进行优化。先分析组合翼升力系数随襟翼高度 y 的变化,再分析组合翼升力系数随距离 x 的变化,得到关系曲线如图 5 与图 6。从图 5 与图 6 中,可以得出主翼襟翼的相对位置 (x, y) 为 $(-20, 75)$ 时,其升力系数较好,选取此位置,此时组合翼整体 C_L 为 -2.443 , C_D 为 0.112 。

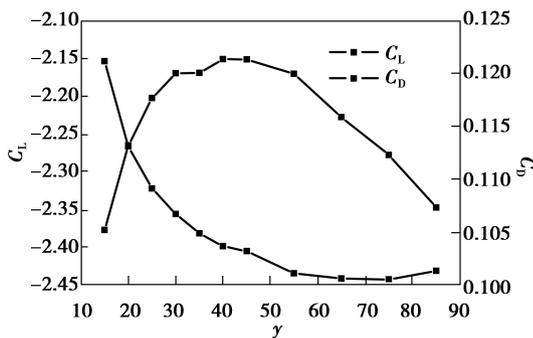


图 5 襟翼负升力系数与阻力系数随 y 变化
Fig.5 The relationship between C_L/C_D and y -coordinate

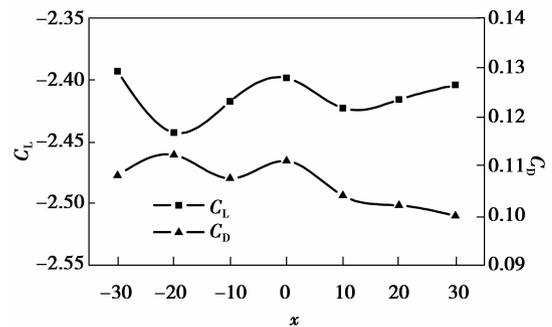


图 6 襟翼负升力系数与阻力系数随 x 变化
Fig.6 The relationship between C_L/C_D and x -coordinate

2.3 定风翼造型与 CFD 建模

确定主翼襟翼攻角与空间位置后,基于计算流体动力学二维数值模拟,得到组合翼升力参数为 -330.9 N/m ,压强云分布如图 7 所示。此参数仅为二维模型的单位展长的升力理论值,转换到三维模型时,因翼展非无限长,负升力会减小至二维模型理论值的 70% 左右。

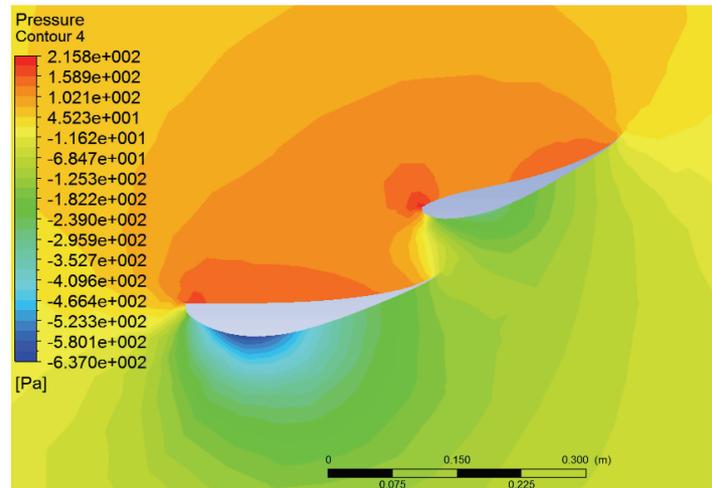
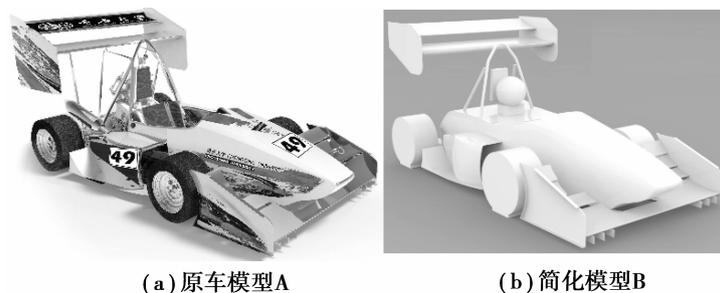


图 7 组合翼静压云图

Fig.7 Pressure contour of 2D joined-wing

基于中国大学生方程式汽车大赛规则,前翼不可以比前胎外侧更宽,尾翼不可以比后胎内侧更宽^[11]。设计前翼宽度为 1 400 mm,结构为一片主翼、三片襟翼。设计尾翼宽度为 840 mm,结构为一片主翼、一片襟翼。加装空气动力学套件的重庆大学方程式赛车队 2015 年油车(风驰-15)如图 8(a)模型 A 所示。考虑整车压心与重心的相对位置,对设计的前翼尾翼进行 CFD 建模。保留赛车车架与总布置结构,简化模型的非关键部件^[12-13],包裹赛车尾部发动机,封闭车手座舱,简化车手与头盔模型。同时将轮辋轮胎实体化成圆柱,尽可能保留赛车细节,最终得到图 8(b)中的简化模型 B。



(a) 原车模型A

(b) 简化模型B

图 8 赛车简化对比

Fig.8 Fengchi-15 model (a) and its simplified model (b)

考虑模型具有对称性,为减小计算量取模型一半计算,模型各结构如图 9 所示。风驰-15 模型长宽高依次为 2 800,700,1 200 mm,模型参数和计算参数如表 1^[14-15]所示。

表 1 CFD 数值模拟参数

Table 1 CFD boundary conditions of FSAE car model

流体域尺寸	网格类型	湍流模型	边界条件	离散格式
长:距车前立面 3 倍车长; 距车后立面 7 倍车长; 宽:距左立面 4 倍模型宽; 高:4 倍车高	非结构网格	Realizable $k-\epsilon$	速度入口: 20 m/s; 压力出口: 0 Pa; 湍流强度: 0.5 %; 湍流长度: 0.26 m; 移动地面: 20 m/s; 车轮旋转: 87 r/s	二阶迎风

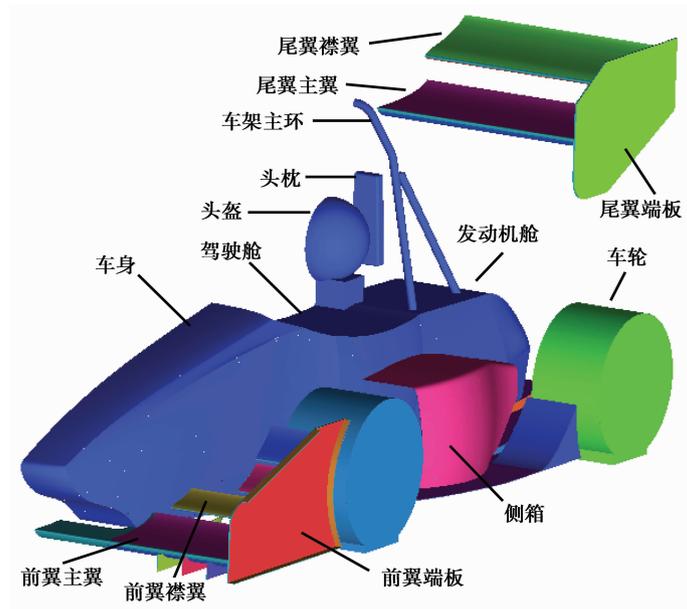


图 9 赛车计算模型

Fig.9 Parts of Fengchi-15 model

模型网格划分如图 10 所示,网格量约为 484 万。初步分析得到赛车各项参数如表 2 所示。进一步计算得出赛车负升阻比为 1.534,前翼负升阻比为 3.587,尾翼的负升阻比为 5.419。

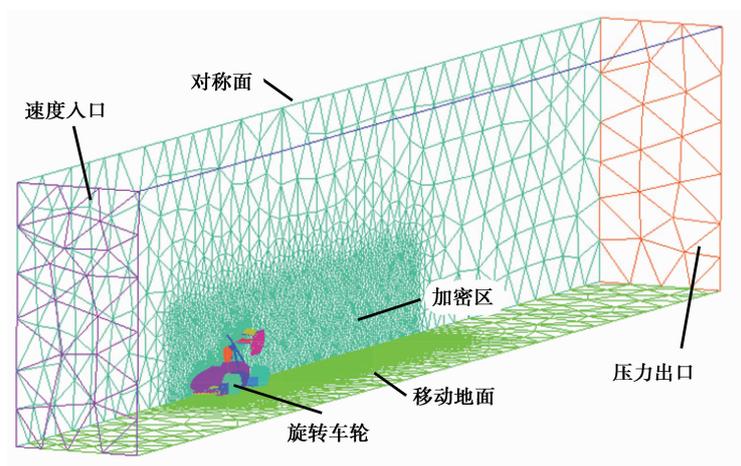


图 10 网格划分与边界设置

Fig.10 Mesh of Fengchi-15 model in ICEM

表 2 风驰-15 整车 CFD 数值模拟结果

Table 2 CFD data of Fengchi-15

部件	力/N	部件	力/N
总升力/阻力	-302.8/197.3	车身升力/阻力	-33.6/86.4
前翼升力/阻力	-165.0/46.0	前轮升力/阻力	50.8/15.7
尾翼升力/阻力	-181.0/33.4	后轮升力/阻力	26.0/15.8

从 CFD 计算结果可知,风驰-15 赛车加装空气动力学套件后,其气动载荷中心在靠前 52.42% 的轴距位置上。赛车设计时前后重量分配为 45:55,重心在靠前 55% 轴距位置上,压心在重心之前,不利于操控稳定性,有待优化。

根据二维翼型理论值的 70% 计算出尾翼升力为 -194.6 N, CFD 模拟算得尾翼升力 -181.0 N, 误差仅为 7.5%, CFD 模拟具有可参考性。同时网格加密至 807 万, 加密前后计算误差为 0.12%, 网格无关性得到验证。

3 曲面定风翼优化对比分析

针对风驰-15 赛车存在的下压力不足、负升阻比较低等问题, 且 2016 版本中国大学生方程式汽车大赛规则对赛车空气动力学套件的进一步限制, 因此在重庆大学 2016 年油车(即风驰-16)的改进设计中着重采用曲面翼来优化前翼和尾翼。采取人工修型与局部优化相结合的方法, 先设计出几种造型策略并逐项对比, 参数化局部寻优并最终选择最优造型策略。

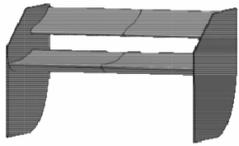
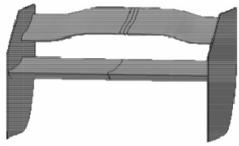
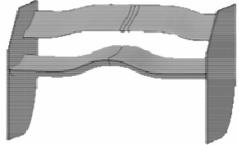
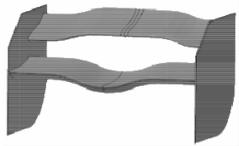
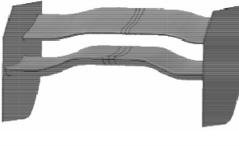
3.1 曲面尾翼设计优化

3.1.1 曲面尾翼造型

2016 版新规则中规定尾翼或空气动力学装置(包括端板)的任何部分, 都不能高于地面 1.2 m。对于多数车队采用的双层或三层尾翼设计, 尾翼高度受限后, 来流更多地被车架主环和头枕阻挡, 尤其三层尾翼结构使主翼来流更少。因此保留风驰-15 的双层尾翼翼型与结构, 借鉴迈凯伦、奔驰 F1 车队的勺翼尾翼设计思路, 改变直尾翼翼面形式, 寻求更大的下压力。

奔驰 F1 的高速勺翼原理为主翼上凸, 主要利用中间部分产生升力, 靠近端板位置平直来减小阻力。笔者设计出 4 种曲面造型策略, 具体优化形式与尺寸见表 3。表中尾翼命名示例: 如“直主翘襟”为尾翼主翼面拉直, 尾翼襟翼弯曲翘起。优化目标为尾翼升阻比提升至 5.4 以上。

表 3 风驰-16 赛车尾翼优化尺寸
Table 3 Types of rear wings for Fengchi -16

名称	尾翼模型	优化尺寸
风驰-15 尾翼		直主翼宽度 840 mm; 直襟翼宽度 840 mm
直主翘襟		主翼保持不变中部拉直; 襟翼中间 2/3 处后翘 50 mm
凸主翘襟		主翼中间 1/3 处上凸 50 mm; 襟翼中间 2/3 处后翘 50 mm
凹主翘襟		主翼中间 1/3 处下凹 50 mm; 襟翼中间 2/3 处后翘 50 mm
翘主翘襟		主翼中间 1/3 处后翘 50 mm; 襟翼中间 2/3 处后翘 50 mm

对优化过的尾翼模型单独进行对比计算,得出的结果如表 4 所示,可以看出“直主翘襟”的尾翼下压力最大,其负升阻比也最大。尾翼的直主翼保证了较大的下压力并为襟翼梳理了良好的流场,而襟翼弯曲、后翘的改变,使得尾翼产生了更大的下压力。从表 4 中可以看出相比于“风驰-15”,“直主翘襟”尾翼增加了 3.5% 的下压力,负升阻比提高了 2.9%,超过升阻比优化目标 5.4。

表 4 风驰-16 赛车尾翼优化尺寸

Table 4 CFD data of rear wings for Fengchi-16

名称	总升力/N	总阻力/N	主翼 升力/N	襟翼 升力/N	负升 阻比
风驰-15	-195.4	36.4	-135.2	-60.2	5.368
直主翘襟	-202.2	36.6	-135.4	-66.8	5.525
凸主翘襟	-173.4	35.0	-113.8	-59.6	4.954
凹主翘襟	-190.6	35.6	-125.6	65.0	5.353
翘主翘襟	-190.8	35.9	-133.6	57.2	5.329

3.1.2 尾翼端板设计优化

因尾翼处于赛车相对较高的位置,来流相对平稳。从尾翼流场分析中发现,尾翼翼面上下气流基本稳定,但翼下靠近端板的地方,因端板较小拉出翼端漩涡,伴有气流溢出,减小了尾翼负升力,迹线图如图 11 所示。因此需对尾翼端板采取参数化分析,得出合理的端板大小,轻量化设计的同时保证流经尾翼气流的稳定性。

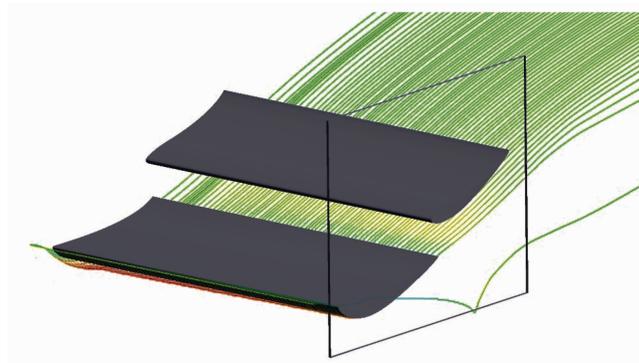


图 11 尾翼端板迹线图

Fig.11 Streamline of rear wing

根据尾翼翼面上下特性,翼下气流迅速抽出压强减小,与上翼面形成压差产生下压力。翼下气流受压易流窜,则尾翼端板重点保护下翼面气流,端板上下长度与前后宽度是分析的 2 个变量。

建立如图 12 示意图,黑框为端板边界,虚线为组合翼边界, a 为组合尾翼前后距端板前后边缘的距离, b 为组合翼上下距端板上下边缘的距离,单位为 mm,以 (a, b) 来命名端板。 a 与 b 取 50 mm 步长,得到如图 13 所示端板压强云图对比,从图 13(a)至图 13(f)中 b 变量改变可以看出,端板下沿距离下翼面 300 mm 较合适,此时端板能保证主翼下翼面气流稳定。图 13(g)中改变 a 变量可知, a 变量对压强云图的影响并不大。因此选取 $a=50$, $b=300$ 的端板基本尺寸,端板形状可沿着压强云图分布进行轻量化切割。

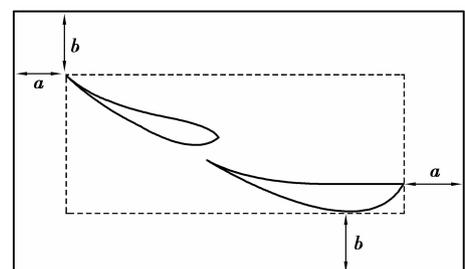


图 12 端板大小示意

Fig.12 Sketch of the end plate

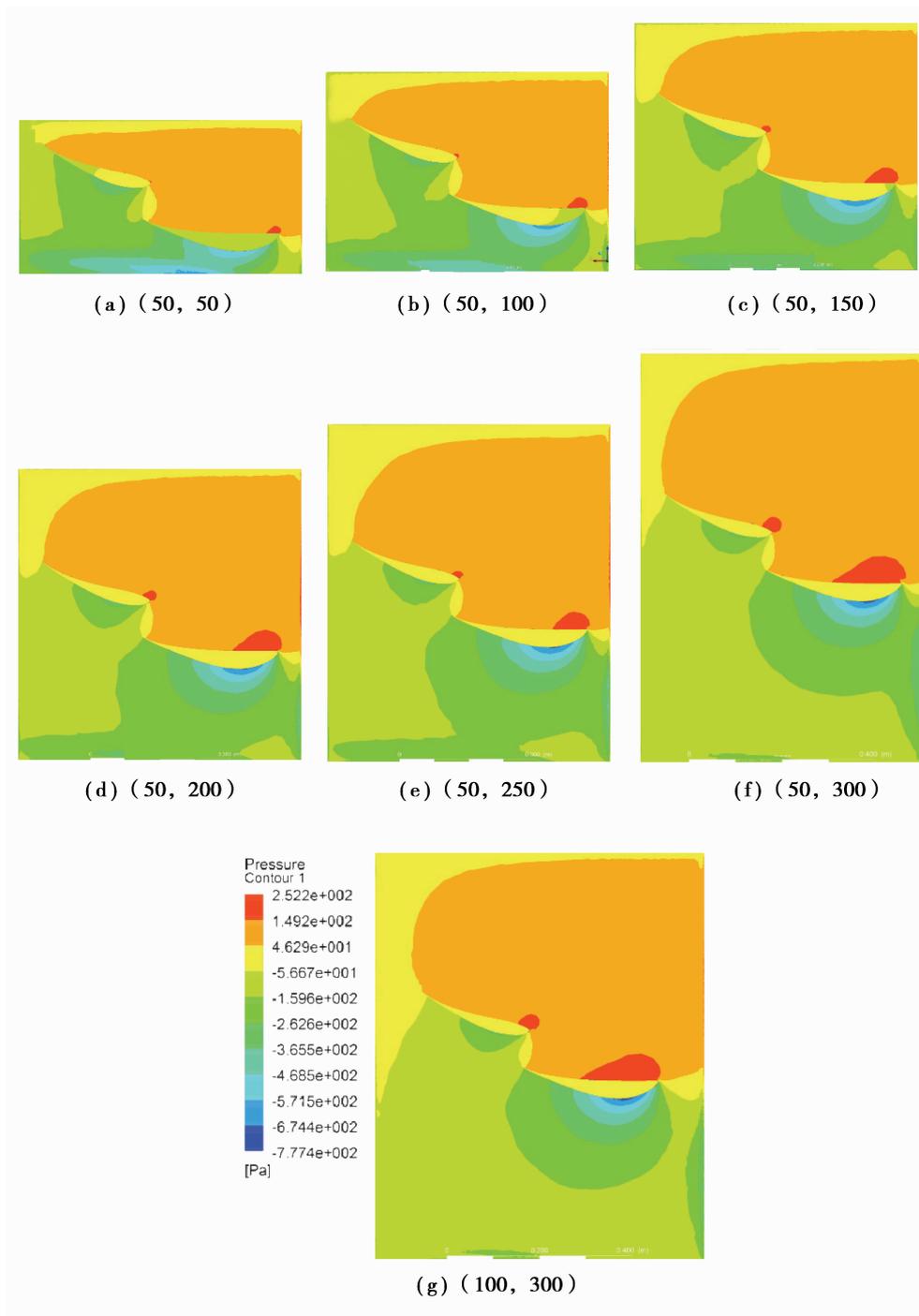


图 13 端板压强云图对比

Fig.13 Pressure contours of end plates

3.2 曲面前翼设计优化

赛车前翼产生用于平衡整车的下压力,增大前轮的抓地力的同时对来流进行疏导。方程式赛车的前轮因暴露在外,巨大的空气阻力有抬起前轮的趋势,不利于赛车过弯,因此前翼造型在保证下压力的同时需考虑前轮与整车的流场^[16]。风驰-15 赛车前翼设计中考虑了前轮扰流,三层襟翼宽度与轮胎宽度一致,位于前轮之前,如图 14。翼下扰流片控制下翼面气流走向,防止下翼面气流发生横向偏转和侧移,减小了气流对前翼后部区域的扰动。

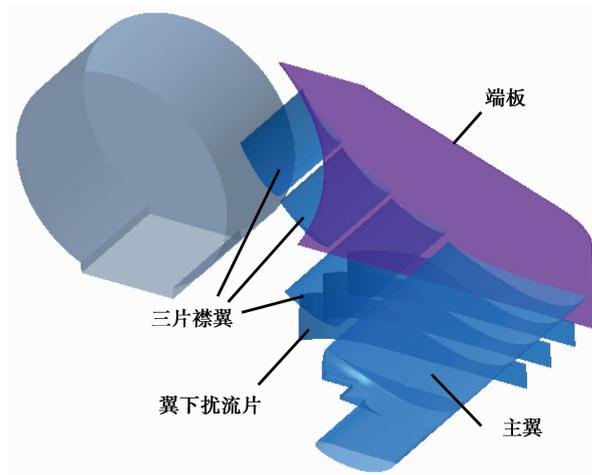


图 14 风驰-15 赛车前翼轮胎模型 (一半)

Fig.14 3D model of front wing with tire of Fengchi-15(half)

2016 版新规则中规定赛车从正视图看,高于地面 250 mm(9.8 英寸)的前轮/轮胎部分,不能被任何空气动力学装置遮挡。即前翼不得高于地面起 250 mm,此规则限制了前翼高度,因此风驰-15 赛车的前翼结构不再符合规则,此时考虑前翼创新结构,造型策略目标为减小前轮阻力并增加前翼下压力。

设计风驰-16 赛车新前翼为箭状曲面前翼,如图 15 所示。新前翼在原先直前翼的中间部分优化为箭状向前结构,前翼两侧、轮胎前的主翼与襟翼部分均为弯曲结构,且从前往后弯曲幅度变大,襟翼弯曲幅度大于主翼。前翼端板亦为组合结构,竖端板前半为直平板,后半弯曲外折,横端板外侧为拱形结构,内侧平直连接主翼与襟翼的末端。

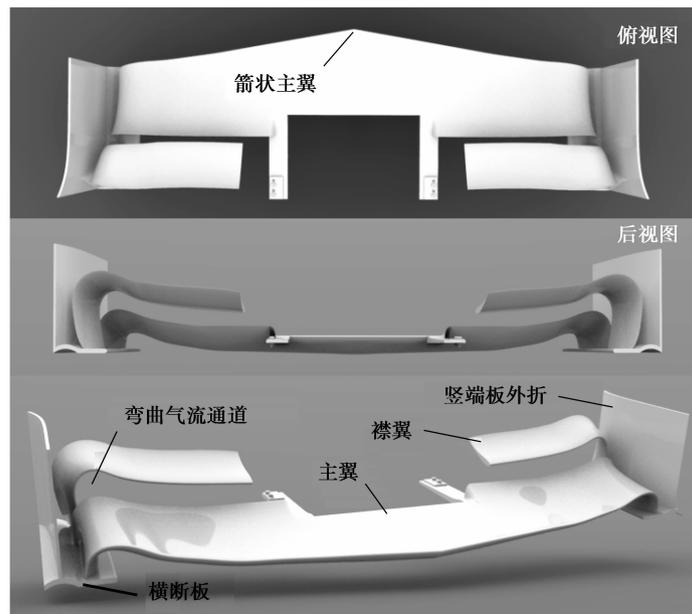


图 15 风驰-16 赛车前翼模型

Fig.15 New curved front wing for Fengchi-16

为快速计算得出前翼优化后的参数,前翼 CFD 分析时仅使用车身前部,由前翼、车头与前轮组成。计算得出新旧前翼的数值参数如表 5 所示。

表 5 新旧前翼 CFD 参数对比

Table 5 Comparison of CFD dates between new front wing and old wing N

部件	风驰-16 新前翼	风驰-15 旧前翼
总升力/阻力	-104.9 / 91.4	-76.0 / 119.4
前翼升力/阻力	-142.4 / 20.0	-132.0 / 52.8
车身升力/阻力	7.5 / 36.8	9.4 / 35.8
前轮升力/阻力	30.0 / 34.6	46.6 / 31.4

从表 5 中可以发现,新版前翼对于增加车身前部下压力、减小阻力的效果明显。新版前翼自身的阻力、前轮升力明显减小,前轮被空气抬起的趋势减小,对整车的操控性有极大的提升。

图 16 的压强云图与迹线图中,表明前翼中部三角结构用于梳理来流,使气流向前翼两侧偏移,伸出的箭状结构增大中部下压力。来流在经过两个前翼之后的路径有很大差异,风驰-15 赛车的旧版前翼只能引导气流从轮胎上部绕开,前翼下仍有气流撞击前轮。

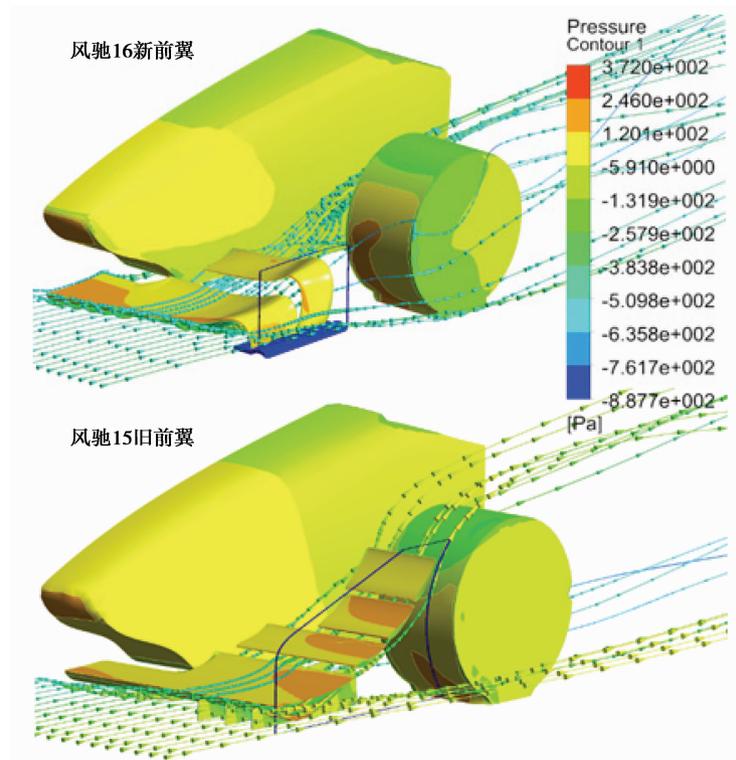


图 16 前翼压强云图与迹线图对比

Fig.16 Pressure contours and streamlines of two front wings

而来流经过风驰-16 赛车的新版前翼的弯曲结构时产生旋转,从前轮的两侧绕过,避免撞击前轮,极大地减小阻力。来流经过弯曲曲面后旋转出漩涡在翼面末端脱落,配合弯曲向外端板的引流,快速通过车身侧面,保证了赛车中后部空气动力学套件有充足的来流。

3.3 赛车周围流场对比分析

对搭载新版前翼尾翼的风驰-16,仍需进行整车 CFD 分析。赛车空气动力学套件中包含底盘扩散器,组合时从前翼尾翼以及车身下压力均有影响。为进一步提高模型精确度,直观了解前翼尾翼对整车流场的影响。将整车模型取一半分析,结果如表 6 所示。

表 6 风驰-16 整车 CFD 数值模拟结果

Table 6 CFD data of Fengchi-16

部件	力/N	部件	力/N
总升力/阻力	-360.6/188.4	车身升力/阻力	-34.0/87.0
前翼升力/阻力	-144.0/18.0	前轮升力/阻力	-24.4/34.6
尾翼升力/阻力	-187.2/33.6	后轮升力/阻力	29.0/15.2

对比表 2 与表 6,可以发现新前翼尾翼提高了 19.08%的整车下压力,减小 4.51%的阻力。从计算结果中得出风驰-16 赛车的气动载荷中心在轴距位置上靠前 56.52%,与 45:55 的整车重量分配比接近,压心移至重心之后,新前翼与尾翼优化效果较好。

具体对比发现,新前翼自身下压力有所降低,主要由于前翼襟翼面积减小,三片襟翼减小至一片襟翼,且旧前翼为直翼面结构利于与扩散器配合。扩散器加速了底部气流抽出,给旧版前翼增加了下压力,但对前轮产生升力,不利于赛车的转向。而新版前翼采用弯曲结构后自身下压力有所下降,但前翼阻力减小了 60.86%,前轮前方气流旋转抽出后,前轮亦有下压力。

整车压强云图与局部气流迹线图如图 17 和 18 所示,图 17,18 中显示气流经过曲面前翼后绕开前轮,整车流场较好。尾翼采用曲面设计后增加 3.43%的下压力,赛车参数明显提升,负升阻提升至 1.914,前翼负升阻比为 8.0,尾翼的负升阻比为 5.571。

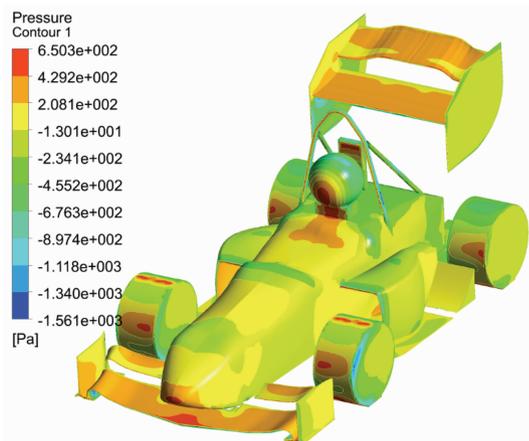


图 17 风驰-16 赛车整车压强云图

Fig.17 Pressure contour of Fengchi-16

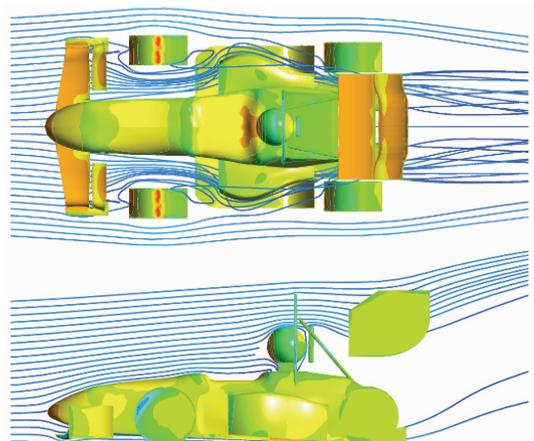


图 18 风驰-16 赛车局部迹线图

Fig.18 Streamline of Fengchi-16

4 结 论

在重庆大学方程式赛车空气动力学套件的前翼尾翼设计中,通过 CFD 三维数值仿真技术,从二维翼型的对比筛选到三维模型的优化,对比分析了不同样式的尾翼与前翼,得出以下结论:

1)翼型结构的升力系数和阻力系数与其空间相对位置有关,主要变量为相对攻角、上下位置与前后位置。襟翼攻角随主翼攻角增大而增大。襟翼升阻力系数与主翼攻角有关,升阻力系数随空间位置变化而变化,但有最优值;

2)相同结构与展长的情况下,尾翼曲面造型影响升阻力系数。双层结构情况下,主翼弯曲(无论是上凸下凹或是后翘)均减小下压力,其中主翼上凸下凹压力减小较明显。而直主翼情况下,襟翼后翘能增大下压力,升阻比则相应提高;

3)前翼相同翼面面积下,来流经过曲面前翼发生旋转,优化了前轮与整车流场,下压力提升显著,且对于以前轮车身为中前部阻力减小显著,但曲面造型增大了加工难度;

4)在后续的研究中,将考虑空气动力学套件中曲面前翼对底盘扩散器的影响,同时因 FSAE 赛车的低速特性,曲面翼仍需在真实流场实验中进行检测与研究。

参考文献:

- [1] Agathangelou B, Gascoyne M. Aerodynamic considerations of a formula 1 racing car[C/OL]//International Congress and Exposition. [S.l.]: SAE, 1998[2017-04-08]. <https://doi.org/10.4271/980399>.
- [2] 赵波,屠建中.基于空气动力学的车身造型设计[J].机械设计与制造,2011(7):48-50.
ZHAO Bo, TU Jianzhong. Car body styling based on aerodynamics[J]. Machinery Design & Manufacture, 2011(7):48-50. (in Chinese)
- [3] Shaw C. Predicting vehicle aerodynamics using computational fluid dynamics-a user's perspective [C/OL] // SAE International Congress and Exposition. [S.l.]: SAE, 1988[2017-04-08]. <https://doi.org/10.4271/880455>.
- [4] Tetsuya F, Takashi S. Aerodynamic design for SR11 (formula SAE racing car)[C/OL]//JSAE/SAE 2013 Small Engine Technology Conference. [S. l.]: SAE, 2013 [2017-04-08]. http://xueshu.baidu.com/s?wd=paperuri%3A%28a72d6d503639050580fc5b2586fc8b51%29&filter=sc_long_sign&tn=SE_xueshsource_2kduw22v&sc_vurl=http%3A%2F%2Fpapers.sae.org%2F2013-32-9100%2F&ie=utf-8&sc_us=10393046657736677452. DOI: 10.4271/2013-32-9100.
- [5] Rehnberg S, Börjesson L, Svensson R, et al. Race car aerodynamics: the design process of an aerodynamic package for the 2012 Chalmers formula SAE car[C/OL]//SAE 2013 World Congress & Exhibition. [S.l.]: SAE, 2013[2017-04-08]. <https://doi.org/10.4271/2013-01-0797>.
- [6] Lu X. Research on the flow field around a formula SAE Car[C/OL]//Symposium on International Automotive Technology 2015. [S.l.]: SAE, 2015[2017-04-08]. <https://doi.org/10.4271/2015-26-0208>.
- [7] Rodrigues J, Souza V R. Evaluation of the effects of adding front and rear wings on the lap times of a formula SAE car[C/OL]//21st SAE Brasil International Congress and Exhibition. [S.l.]: SAE, 2012[2017-04-08]. <https://doi.org/10.4271/2012-36-0136>.
- [8] 王玮,马健,刘攀. FSC 赛车翼型的选择与二维流场分析[J]. 科技创新与应用, 2015(22):14-15.
WANG Wei, MA Jian, LIU Pan. Research on the wing section and the flow field for formula SAE car[J]. Technology Innovation and Application, 2015(22):14-15. (in Chinese)
- [9] 张劼,乐玉汉,骆阳. 基于CFX的方程式赛车绕流场分析与优化[J]. 武汉理工大学学报, 2014(2):217-221.
ZHANG Jie, LE Yuhan, LUO Yang. Optimization of flow field for formula SAE car based on CFX[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014(2):217-221. (in Chinese)
- [10] 陈景秋,胡韩飞,张永祥. Star-CDC 对汽车外流场的三维数值模拟[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2005, 28(4):99-101.
CHEN Jingqiu, HU Hanfei, ZHANG Yongxiang. Optimization of car flow field based on Star-CD[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science), 2005, 28(4):99-101. (in Chinese)
- [11] 中国大学生方程式汽车大赛组委会. 2016 中国大学生方程式汽车大赛参赛手册[Z]. 北京: 中国汽车工程协会, 2016: 47-50.
The Organizing Committee of Formula Student China. Chinese rules of Formula Student China[Z]. Beijing: The Society of Automotive Engineers, China, 2016: 47-50. (in Chinese)
- [12] 李翠萍,李建华.基于CFD的FSAE赛车车身优化设计[J]. 机械设计,2014,13(8):70-73.
LI Cuiping, LI Jianhua. Optimization design of FSAE racing car body based on CFD[J]. Journal of Machine Design, 2014, 13(8):70-73. (in Chinese).
- [13] 孙帮成,李明高. ANSYS FLUENT 14.0 仿真分析与优化设计[M]. 北京: 机械工业出版社,2014.
SUN Bangcheng, LI Minggao. ANSYS FLUENT 14.0 simulation analysis and optimization design[M]. Beijing: China Machine Press, 2014. (in Chinese).
- [14] 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. Aerodynamics 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)
- [15] Chandra S, Lee A, Gorrell G. CFD analysis of pace formula-1 car[J]. Computer-Aided Design & Applications, 2011(1): 1-14.
- [16] Shao S, Zhang Y, Zhao J. The influence of wheel rotating to FSAE racing car aerodynamic characteristics[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 300/301: 1054-1057.