

文章编号:1000-8055(2013)10-2343-05

F1 方程式赛车后升力翼的气动特性

何忆斌^{1,2}, 李伟平², 刘孟祥¹, 雷吉平¹, 杨震宇¹

(1. 湖南涉外经济学院 机械工程学院, 长沙 410205;

2. 湖南大学 机械与运载工程学院 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082)

摘 要: 以比例为 1:3 的 F1 方程式赛车后升力翼为研究对象,研究了后升力翼攻角变化对 F1 方程式赛车气动阻力和气动升力的影响规律. 在攻角为 12°时,气动升力与气动阻力的比值的绝对值达到最大,此攻角就是 F1 方程式赛车后升力翼的最佳攻角,模型风洞试验验证了这一结论.

关 键 词: F1 方程式赛车; 后升力翼; 气动升力; 气动阻力; 攻角

中图分类号: V21; U461

文献标志码: A

Rear lifting airfoil aerodynamic characteristic of F1 racing car

HE Yi-bin^{1,2}, LI Wei-ping², LIU Meng-xiang¹, LEI Ji-ping¹, YANG Zhen-yu¹

(1. School of Mechanic Engineering, Hunan International Economics University,
Changsha 410205, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body,
College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University,
Changsha 410082, China)

Abstract: Taking the rear lifting airfoil of scale of 1:3 F1 racing car as the object of study, the influence law of angle of attack of rear lifting airfoil on the aerodynamic drag and lift of the F1 racing car was researched. When the angle of attack is 12°, the absolute value of aerodynamic lift and drag ratio reaches the maximum, and the angle is the optimum angle of attack of rear lifting airfoil for F1 racing car. Model wind test validated the conclusion.

Key words: F1 racing car; rear lifting airfoil; aerodynamic lift;
aerodynamic drag; angle of attack

F1 方程式赛车作为汽车运动最高级别的赛事,不仅代表了现代汽车运动的最高竞技水平,也是衡量现代汽车技术发展最高水准(特别是汽车空气动力学)的重要标杆. F1 方程式赛车直线行驶的最高时速可达到 410 km/h,远超过波音 747 客机的起飞速度(280~300 km/h),其气动特性直接影响到赛车的动力性和操纵稳定性. 由于 F1 方程式赛车的抓地力 2/3 以上由后轮承担,后负升力对 F1 方程式赛车的动力性及操纵稳定性影

响很大.

F1 方程式赛车气动特性研究是目前国际上汽车空气动力学研究的一个热门领域^[1-5],很多的研究成果已经应用于乘用车,比如后升力翼、扰流板、发动机舱散热等,是汽车技术发达国家的核心技术之一. 在国内,由于汽车空气动力学研究起步较晚,对 F1 方程式赛车的气动特性研究还十分匮乏. 2005 年,武汉体育学院的马勇等^[6]利用计算流体力学对 F1 方程式赛车的外形进行了气

收稿日期:2012-08-09

网络出版地址:

基金项目:湖南省科技计划(2012SK3171);湖南省自然科学基金(13JJ5038)

作者简介:何忆斌(1967—),男,湖南长沙人,副教授,博士,主要从事汽车空气动力学方向的研究.

动特性优化. 2007 年, 湖南大学的郭军朝开展了汽车理想车身造型与赛车空气动力学研究^[7]. 2008 年, 湖南大学的潘小卫等^[8]对 F1 方程式赛车的气动特性进行了较为详细的研究. 本文通过赛车后升力翼翼片攻角的变化来研究赛车气动阻力和气动升力的变化规律, 并从中得到最佳的后升力翼翼片攻角.

1 模型及研究方案

1.1 模型

研究模型分为比例为 1 : 3 的实车缩比模型和 1 : 3 的 CAD 模型(如图 1 所示), CAD 模型通过对实物模型进行逆向工程求得. 因为只研究后升力翼翼片攻角的变化对赛车气动阻力和气动升力的影响规律, 本文采用整车和前升力翼固定不变而后升力翼可装拆的模式来进行研究. 图 2 为后升力翼比例为 1 : 3 的 CAD 模型.

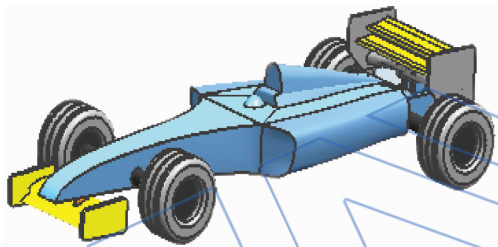


图 1 实车比例为 1 : 3 的 CAD 模型
Fig. 1 CAD model of racing car with scale of 1 : 3

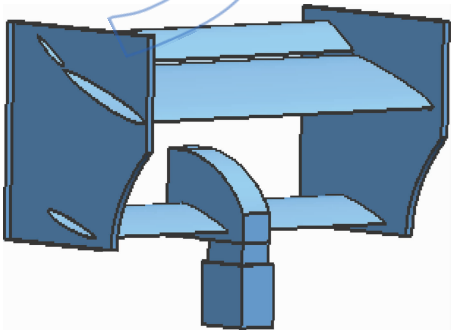


图 2 后升力翼比例为 1 : 3 的 CAD 模型
Fig. 2 CAD model of rear lifting airfoil
with scale of 1 : 3

1.2 研究方案

当攻角 $\alpha=0^\circ$ 时, 后升力翼对下压力的贡献度最小, 这时的阻力也处于最小, 但赛车的操纵稳定性最差. 为了提高赛车的操纵稳定性, 设计师宁愿采用牺牲赛车动力性的设计策略^[9], 即增加攻角

α 来提升赛车的下压力. 本文通过增加后升力翼翼片攻角 α (如图 3 所示), 以 2° 为一个步长来研究整车气动阻力和气动升力的变化规律, 通过与基础数据的比较来探寻后升力翼翼片攻角的最佳数值.

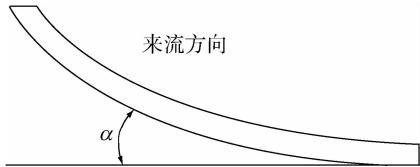


图 3 后升力翼翼片攻角
Fig. 3 Angle of attack of rear lifting airfoil

2 CFD 仿真分析

2.1 湍流模型

本文采用汽车绕流问题求解中应用最为广泛的湍流模型 $k-\epsilon$ 二方程模型^[10-13]. 采用低雷诺数修正或通过壁函数法对壁面附近涡黏系数进行特殊处理, 将高雷诺数 $k-\epsilon$ 模型应用到壁面附近区域的计算中, 有效提高计算精度^[14-15].

湍动能(k)方程为

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \text{div} \left[\rho \mathbf{v} k - \left(\mu + \frac{\mu_t}{Pr_k} \right) \nabla k \right] = G - \rho \epsilon$$

式中 Pr_k 为湍动能 k 的 Prandtl 数, 为 1.0; ρ 为空气密度, 常温下为 1.29 kg/m^3 ; μ 为空气黏度.

湍动能耗散率(ϵ)方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \text{div} \left[\rho \mathbf{v} \epsilon - \left(\mu + \frac{\mu_t}{Pr_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] = \\ (C_{\epsilon 1} G - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon) \frac{\epsilon}{k} \\ \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \\ G = \mu_t \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \end{aligned}$$

式中 $\mathbf{v}$ 为速度; Pr_ϵ 为湍动能耗散率 ϵ 的 Prandtl 数, 为 1.3; $C_\mu, C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}$ 为经验常系数, 分别取为 0.09, 1.44 和 1.92; v_i, v_j 为速度分量, x_i, x_j 为坐标分量, $i=1, 2, 3, j=1, 2, 3$.

2.2 计算网格与仿真软件

应用前处理专业软件 ANSYS ICEM 对几何表面进行处理, 以 nastran 的格式导出生成的四面体网格单元, 为了提高计算精度在赛车的表面边界层及后升力翼附近进行局部加密, 计算区域长为 10 倍车长, 宽为 5 倍车宽, 高为 5 倍车高, 整

个计算区域网格数量约为 245 万。仿真软件采用 ANSYS CFX13.0 流体分析软件。图 4 为整车的计算网格。

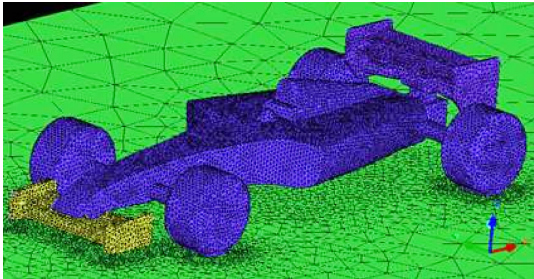


图 4 整车计算网格

Fig. 4 Calculation grids of racing car

2.3 边界条件及初始条件

计算域入口处来流速度: x 方向来流速度 $U=55\text{ m/s}$ (198 km/h); y 方向来流速度 $V=0\text{ m/s}$; z 方向来流速度 $W=0\text{ m/s}$.
入口处湍流度: 0.5% , 入口气流为均匀层流.

计算域上壁面和侧壁面边界: 自由滑动壁面.
计算域下壁面(即模拟地面)边界: 移动壁面边界, 移动速度与来流速度相同.
车身模型壁面边界: 固壁、无滑移条件.
出口边界: 给定压力边界条件, 相对于远方来流处的压力为 0 Pa .

2.4 计算结果

后升力翼的上翼片、中翼片和下翼片攻角采用同步 2° 的变化步长, 并由公式 $F=0.5\rho U^2 SC$ (C 用来代表 C_d 或 C_l) 可以求出气动阻力系数 C_d 和气动升力系数 C_l . 其中 $S=0.385\text{ m}^2$ ($\alpha=0^\circ$); $U=198\text{ km/h}$; $\rho=1.29\text{ kg/m}^3$.

计算结果如表 1 所示.

从表 1 可以看出: 攻角为 12° 时气动升力和气动阻力系数比值的绝对值达到最大, 此攻角即为该后升力翼的最佳攻角.

攻角为 12° 时的速度矢量图和压力云图如图 5 和图 6 所示.

表 1 气动特性计算结果
Table 1 Calculational results of aerodynamic characteristic

攻角 $\alpha/(^\circ)$	阻力/N	升力/N	阻力系数 C_d	升力系数 C_l	C_l/C_d
0	285.67	-785.89	0.3802	-1.0462	-2.751
2	296.48	-882.67	0.3946	-1.1750	-2.982
4	304.97	-1005.45	0.4060	-1.3885	-3.420
6	325.65	-1289.37	0.4335	-1.7164	-3.959
8	344.87	-1397.32	0.4591	-1.8601	-4.051
10	425.06	-1758.65	0.5658	-2.3411	-4.137
12	500.98	-2100.46	0.6669	-2.7961	-4.192
14	575.12	-2245.42	0.7656	-2.9891	-3.904
16	670.96	-2345.88	0.8932	-3.0393	-3.403
18	789.23	-2365.93	1.0510	-3.0421	-2.894
20	923.45	-2415.44	1.2292	-3.2154	-2.616
22	1078.67	-2447.12	1.4359	-3.2745	-2.281

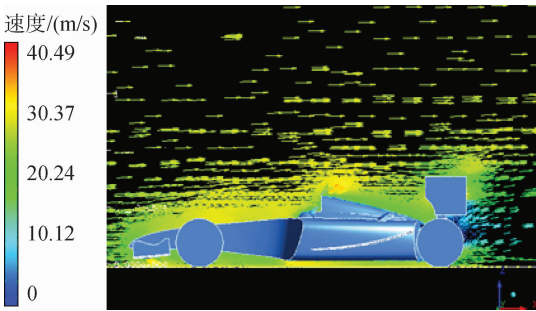


图 5 攻角为 12° 时的速度矢量图

Fig. 5 Velocity vector of angle of attack of 12°

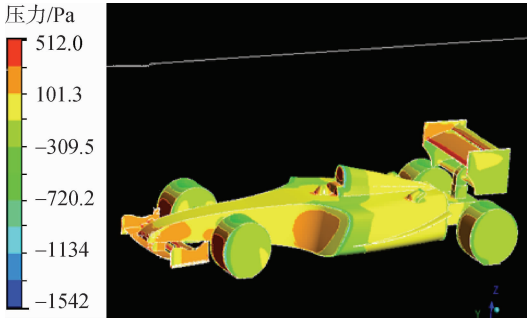


图 6 攻角为 12° 时的压力云图

Fig. 6 Pressure contour of angle of attack of 12°

3 风洞试验

1 : 3 的实车缩比模型在湖南大学 HD-2 风洞高速段进行试验(见图 7),为了和仿真计算结果进行比较,试验风速为 55 m/s. 试验中以 2°的变化步长改变后升力翼翼片攻角. 试验结果如表 2 所示.



图 7 风洞试验
Fig.7 Wind tunnel test

表 2 气动特性试验结果
Table 2 Experimental results of aerodynamic characteristic

攻角 $\alpha/(^{\circ})$	阻力/N	升力/N	阻力系数/ C_d	升力系数/ C_l	C_l/C_d
0	304.46	-828.77	0.4053	-1.0326	-2.7221
2	342.13	-992.69	0.4554	-1.3213	-2.9015
4	398.87	-1302.51	0.5310	-1.7340	-3.2655
6	445.65	-1679.21	0.5933	-2.2360	-3.7680
8	494.77	-1978.39	0.6586	-2.6335	-3.9986
10	567.34	-2283.26	0.7552	-2.7188	-4.0245
12	601.58	-2459.86	0.8008	-2.8925	-4.0890
14	645.23	-2511.62	0.8589	-2.9490	-3.8926
16	718.87	-2411.09	0.8932	-3.1228	-3.4850
18	797.23	-2172.77	1.0613	-3.1495	-2.9676
20	953.66	-2215.35	1.2695	-3.2576	-2.5660
22	1154.59	-2285.16	1.5370	-3.3434	-2.1753

图 8 为赛车阻力系数 C_d 、升力系数 C_l (绝对值)、升力系数和阻力系数比值 C_l/C_d (绝对值)的风洞试验结果与计算结果的对比图.

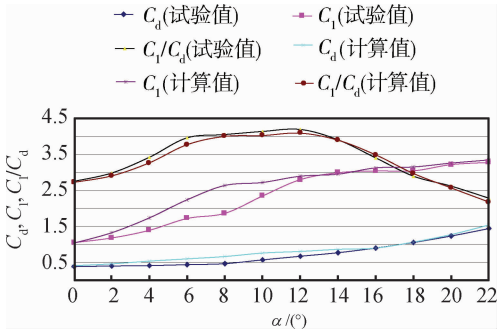


图 8 试验结果与计算结果的对比

Fig.8 Comparison of experimental results and calculational results

4 结 论

随着攻角 α 的逐渐加大阻力系数逐渐增大,升力系数也逐渐增大,但攻角 α 为 12°时升力系数不再增加,升力系数与阻力系数的比值在攻角 α 到达 12°达到最大. 风洞试验结果也很好地反映了这种变化趋势. 由于计算模型忽略了底盘及车身附件和侧翼,计算结果比风洞试验结果在数值上要小,但整体变化趋势一致.

参考文献:

[1] Wright P G. The influence of aerodynamics on the design of formula one racing cars[J]. International Journal of Vehicle Design,1982,3(4):383-397.
[2] Agathangelou B,Gascoyne M. Aerodynamic considerations of a formula 1 racing car[R]. Warrendale,US:SAE Technical Report 980399,1998.
[3] Katz J. High-lift wing design for race-car applications[R]. Warrendale,US:SAE Publication 951976,1995.

- [4] Jeffrey D, Alperin M. Aspects of the aerodynamics of year 2000 formula one racing cars[R]. Rugby, UK; 3rd Mira International Vehicle Aerodynamics Conference, 2000.
- [5] Jeffrey D, Zhang X, Hurst D. Aerodynamics of gurney flaps on a single-element high-lift wing[R]. Journal of Aircraft, 2000, 37(2): 295-302.
- [6] 马勇, 郑伟涛, 韩久瑞, 等. 计算流体力学在 F1 赛车运动中的应用[J]. 武汉体育学院学报, 2005, 39(3): 52-55.
MA Yong, ZHENG Weitao, HAN Jiurui, et al. Application of computational fluid dynamics in the formula one[J]. Journal of Wuhan Institute of Physical Education, 2005, 39(3): 52-55. (in Chinese)
- [7] 郭军朝. 理想车身气动造型研究与赛车空气动力学[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
GUO Junchao. Research on ideal car body's aerodynamic styling and initial aerodynamic analysis of F1 racing car [D]. Changsha: Hunan University, 2007. (in Chinese)
- [8] 潘小卫, 谷正气, 何忆斌, 等. F1 赛车气动特性的 CFD 仿真和试验研究[J]. 汽车工程, 2009, 31(3): 274-277.
PAN Xiaowei, GU Zhengqi, HE Yibin, et al. CFD simulation and experimental study on the aerodynamic characteristics of a F1 racing car. [J] Automotive Engineering, 2009, 31(3): 274-277. (in Chinese)
- [9] 谷正气. 汽车空气动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [10] 谢金法, 庄继德, 高峰, 等. 模型轿车空气动力特性的研究[J]. 中国机械工程, 2000, 11(7): 817-819.
XIE Jinfa, ZHUANG Jide, GAO Feng, et al. A testing research on the aerodynamic characteristics of typical automobile model[J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(7): 817-819. (in Chinese)
- [11] 郑昊, 康宁, 蓝天. 侧风环境下行驶的直背式轿车气动力计算[J]. 航空动力学报, 2007, 22(11): 858-1862.
ZHENG Hao, KANG Ning, LAN Tian. Calculation of aerodynamica forces of a car with the effect of crosswind [J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(11): 1858-1862. (in Chinese)
- [12] 何忆斌. 汽车车身气动造型优化研究及工程应用[D]. 长沙: 湖南大学, 2008.
HE Yibin. Aerodynamic styling optimization research for automobile body and engineering application[D]. Changsha: Hunan University, 2008. (in Chinese)
- [13] 何忆斌, 谷正气, 吴军, 等. 三方程在汽车外流场仿真计算中的应用[J]. 机械工程学报, 2008, 44(1): 184-189.
HE Yibin, GU Zhengqi, WU Jun, et al. Application of three-equation turbulence model in numerical simulation of vehicle external flow field[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(1): 184-189. (in Chinese)
- [14] 吴军, 钟志华, 谷正气, 等. 汽车外流场数值仿真的进一步研究[J]. 机械工程学报, 2003, 39(9): 110-113.
WU Jun, ZHONG Zhihua, GU Zhengqi, et al. Numerical solution of air flow around the car body using SST turbulence model[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(9): 110-113. (in Chinese)
- [15] 吴军, 谷正气, 钟志华, 等. SST 湍流模型在汽车绕流仿真中的应用[R]. 汽车工程, 2003, 25(4): 326-329.
WU Jun, GU Zhengqi, ZHONG Zhihua, et al. The application of SST turbulence model in the aerodynamic simulation of the automobile[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2003, 25(4): 326-329. (in Chinese)