

# Aerodynamic Drag Optimization of Vehicle Rear Structure Based on Isight

Yangyang Yuan, Furen Zhang

College of Mechanical and Vehicular Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400074, China

**Abstract:** For the tail which has the greatest influence on the aerodynamic drag of the automobile, it is modified based on the internationally accepted MIRA model and three-dimensionally modeled at CATIA. Fifteen sample points were selected by the optimal Latin hypercube for the three parameters. The semi-structured hexahedral mesh and the k- $\Omega$  SST model were selected to simulate the outward flow field of the modified car model. According to the calculated Results The RBF agent model was established. Finally, three parameters related to the tail structure were optimized by MIGA to reduce the Cd value of aerodynamic drag coefficient.

**Keywords:** rear type; MIRA model; Optimization Latin hypercube; proxy model; optimization algorithm; aerodynamic drag

## 基于 Isight 的汽车尾部结构气动阻力优化

袁阳阳, 张甫仁

重庆交通大学机电与车辆工程学院, 重庆, 中国, 400074

**摘要:** 对影响汽车气动阻力最大的尾部, 以国际通用的 MIRA 模型为基础进行改型, 在 CATIA 进行三维建模。通过最优拉丁超立方对三个参数选取 15 个样本点, 选取六面体半结构化网格和  $k-w$  SST 模型, 对改型后的汽车模型进行外流场的仿真分析, 并根据求得的结果运用 Isight 建立 RBF 代理模型, 最后利用多岛遗传算法 (MIGA) 优化涉及尾部结构的 3 个参数, 达到减小汽车气动阻力系数 Cd 值的目的。

**关键词:** 尾部结构; MIRA 模型; 最优拉丁超立方; 代理模型; 优化算法; 气动阻力

### 1 引言

汽车行驶过程中的空气阻力是汽车空气动力学中的重要研究部分, 而行驶时的阻力分为外部阻力和内部阻力, 外部阻力又由形阻和诱导阻力两部分组成, 诱导阻力是升力在汽车行驶方向的的水平分力, 而计算形阻时, 空气的粘性效应均需考虑在内<sup>[1]</sup>。

研究表明: 在汽车行驶的过程中的阻力中超过八成来自于汽车前后的压差阻力, 其余为摩擦阻力, 而汽车尾部所产生的阻力又占到压差阻力中的 90% 以上, 从气动阻力的形成机理来看, 它是由形阻和涡阻构成, 涡阻占了总阻力的 40% 左右, 它明显取决于尾流的结构。所以汽车尾部结构的研究在减少整车的阻力中起到重要作用。随着现代计算机技术的发展, 在汽车空气动力学的研究方法中, CFD 技术已经在研究汽车气动特性方面得到了广泛的应用。传统的用 CFD 方法进行汽车气动性能的设计时, 要大量的时间对样

本点进行仿真模拟, 计算时间长, 设计周期慢。而对于多因素多水平的尾部结构可以用 DOE 的方法来减少模拟仿真的次数从而缩减开发周期。为了进一步提高效率, 代理模型和各种优化算法也开始逐渐被人们引入到了汽车空气动力学的研究当中。

所以采取最优拉丁超立方对关键参数进行样本点的取样, 然后对有限个样本点进行计算, 得出了响应值后建立 RBF 代理模型, 进而运用 MIGA 算法进行参数的寻优。具体优化流程如图 1 所示。

### 2 几何模型

#### 2.1 原始 MIRA 模型

研究的基础为国际通用的 MIRA 阶背式模型<sup>[2]</sup>, 该模型省略的雨刷、后视镜、进气格栅等部分, 保留了主要的汽车特征。汽车尾部行李箱上的扰流器有鸭尾状尾翼, 雨后行李箱盖成一体式。还有一种是具有扰流板的尾翼, 通过两端支架与后行李箱盖连接。后

者这种分体式的扰流器会影响尾部流动的平顺性。因此将两种结构结合起来，将尾翼部分和整个后行李箱融合在一起，形成一体式。MIRA 阶背式模型和改型结构模型如图 2 所示。

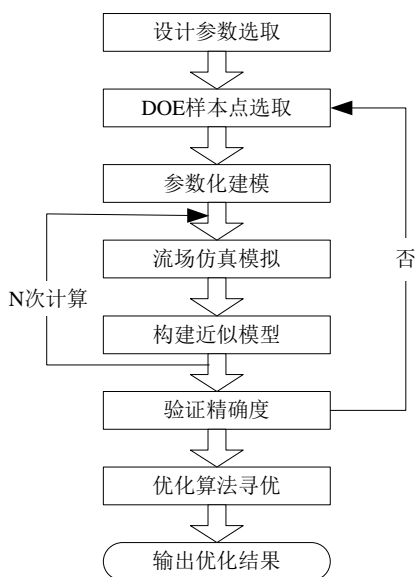


Figure 1. Optimization process  
图 1. 优化流程

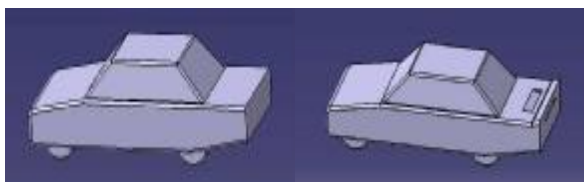


Figure 2. MIRA model (left) and initial model (right)  
图 2. MIRA 模型（左）与初始改型模型（右）

改型后尾部结构与原始模型的不同之处在于：①行李箱部分有一个斜向的凹槽；②行李箱后部分有类鸭尾状的扰流板。为了研究改型后尾部结构 3 个尺寸对汽车气动阻力的影响，将控制凹槽部分的因素由长  $L$ ，倾角  $b$  组成，控制鸭尾状扰流板的因素由攻角  $a$  组成。各控制参数如图 3 所示。

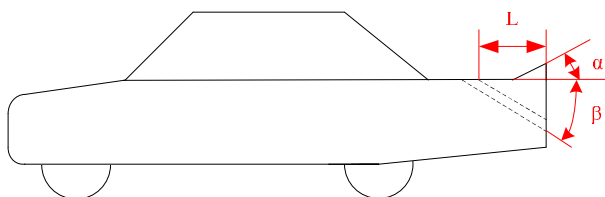


图 3. 改型后尾部结构形状与参数

## 2.2 DOE 样本点选取

建立代理模型之前的步骤就是要选取实验所需要的样本点，而合理高效的实验样本点又是构建高精度近似模型、减少计算时间的关键。采用最优拉丁超立方对各参数进行样本点的取样包括了拉丁方超立方的两个优点：①有效的空间填充能力，每个因子的水平等于点数，并进行随机组合；②可以拟合二阶或更非线性的相应。并且比拉丁超立方（LHD）设计方法产生的实验样本点更均匀，使得实验参数和响应之间的关系十分的贴合现实<sup>[3]</sup>。

在进行样本点选取之前，应确定改型后尾部结构各参数的取值范围。根据部分汽车实际尾翼尺寸，改型后的模型尺寸初始值为： $L=250$ ， $a=25^\circ$ ， $b=20^\circ$ 。三个设计变量取值范围如下表所示。

Table 1. Design variable range  
表 1. 设计变量取值范围

参数名称	初始值	取值范围
L	250mm	200mm-350mm
a	25°	10°- 60°
b	20°	10°- 35°

## 3 数值模拟

### 3.1 流场网格

为了兼顾计算时间和计算精度，采用在车身表面生成三棱柱网格，其他部分混合生成多面体和四面体网格的方法。同时在车身周围区域分级建立网格加密区域，更加精确的模拟实际过程中车身外部气流的流动。在 Star ccm+中模拟仿真汽车以 30m/s 高速行驶，无侧风作用工况下汽车外流场的情况。因此计算域边界条件设置如下表。

Table 2. Calculation domain boundary condition settings  
表 2. 计算域边界条件设定

边界名称	边界条件类型
计算域入口	速度入口 V=30m/s
计算域出口	压力出口 P=101325Pa
计算域地面/侧面	滑移壁面边界
车身表面/车轮	无滑移壁面边界

### 3.2 湍流模型

在外流场仿真时常用的两方程湍流模型的是  $k-e$  模型。可是在某些情况下，它有着以下三个不足之处：（1）在  $k-e$  模型中，湍流尺度不可知；（2）只有当湍流边界层压力较为稳定时，模型模拟效果较好；（3）仿真模拟的结果和实际情况之间的差异想运用壁面函数来修正有一定的难度<sup>[4]</sup>。由于以上原因，湍流模型不能选用  $k-e$  模型。相比之下， $k-w SST$  没有这些缺点，因为①在不同的压力梯度变化下，该模型同样能够使用；②模型也适用于流场中的粘性内层，运用壁函数可以准确模拟边界层内流体的流动，而不使用更容易失真的粘滞衰减函数。 $k-w SST$  模型的优势在于：即在低雷诺数下，对近壁面流场流动的处理。特别是在边界层中由于逆向压力而发生流动分离的区域拥有较高的精度。正是因为 Baseline  $k-w$  模型不能处理湍流剪切应力传输问题，在模拟光滑表面的气流分离时往往不够准确不得不引入粘滞系数。Baseline  $k-w$  模型与粘滞系数组成  $k-w SST$  湍流模型<sup>[5-6]</sup>。

最后将  $k-w SST$  为气动阻力模拟的湍流模型。对各种压力梯度下的边界层问题，工程上都选择此模型用来模拟实际流场的流动。本仿真研究的是尾部结构对流动的影响，就需要较高精度的边界层内的流动模拟，因此能够较好地模拟边界层流动的  $k-w SST$  湍流模型成为了最后的选择<sup>[7]</sup>。

## 4 优化方法和结果

### 4.1 仿真结果

在 Star-ccm+ 中计算完所有样本点后，更新样本点矩阵，利用更新的样本点和响应的矩阵建立代理模型。改型后的初始模型对应的阻力系数  $Cd=0.3273$ 。

Table 3. DOE sample point matrix and Cd values  
表 3. DOE 样本点矩阵及 Cd 值

序号	L(mm)	a (deg)	b (deg)	Cd
1	264	31	17	0.3621
2	221	14	31	0.3808
3	232	15	56	0.4966
4	307	12	53	0.4752
5	200	28	24	0.3682
6	243	17	10	0.3476

7	286	24	60	0.5152
8	339	30	21	0.3677
9	329	33	46	0.4349
10	275	23	35	0.4004
11	254	35	42	0.4193
12	350	21	39	0.4111
13	296	10	28	0.3754
14	318	19	14	0.3555
15	211	26	49	0.4518

### 4.2 构建代理模型

近似代理模型是指通过拟合多组输入样本点和输出的结果，将它们之间的关系以数学模型方式表现出来的方法。其本质就是在挑选汽车参数时，由试验设计法选取参数的样本点作为输入变量，在通过 CFD 软件计算样本点对应的响应值作为输出变量，再利用这些输入和输出变量所组成的矩阵构建近似代理模型作为汽车形状的预测模型，最后在合适的算法中进行参数优化得到所需的解并回代到代理模型中进行误差验证。这种代理模型的思路，加快了优化算法的寻优速度，提高优化效率。

因此，选择合适的代理模型，准确地寻找出输入变量与响应之间的关系非常关键。选取 RBF 近似模型作为最终构建的代理模型，此模型的优点是：①具有很强的逼近复杂非线性函数的能力，②较强的容错能力，即使样本点中含有噪声输入，也不影响网格的整体性能，③相同的模拟精度所需的样本点最少，能极大的节约优化时间<sup>[8]</sup>。

### 4.3 多岛遗传算法优化

多岛遗传算法是由传统遗传算法进化而来的一种算法。由于它是通过对结构对象进行直接的操作，所以在优化探索是不存在推导的限制，同样也不用考虑函数的连续性问题<sup>[9]</sup>。在探索求解时，评判个体优劣的标准只有一个就是适应度函数。此次研究运用径向基函数神经网络 (RBF) 模型作为适应度函数。优化遗传操作考虑个体的适应性，以确定其繁殖的机会。只有具有较高适应值的个体才有更多的机会繁衍，并将优秀的基因传递下去。因此新生成的种群的适应度的平均值都会高于老群体的平均值。这样就会使得后代优良基因更多，逼近最

优解的速度就会大大加快。

采用多岛遗传算法 (MIGA) 寻找汽车尾部结构的最优参数解。将设计变量值转换为 0 和 1 个字符的二进制字符串。这种转换被称为个体的“编码”。在计算个体的适应度值后, 通过比率选择运算、单体交叉运算、基本位变异运算的遗传操作改变每个群体中的参数样本点从而产生新一代群体。多岛遗传算法与传统遗传算法区分的主要特征是每个个体被划分成几个子群, 称为“岛”。所有的遗传操作过程分别发生在每个子群上, 而控制遗传操作过程的各个参数如表 3 进行设置。通过多岛遗传算法优化涉及尾部结构的 3 个参数, 达到减小汽车气动阻力系数 Cd 值的目的。

Table 4. Calculation domain boundary condition settings

表 4. 计算域边界条件设定

参数名称	参数值
子群规模	100
子群个数	10
进化代数	5
变异率	0.01
交叉率	1.0
岛间迁移率	0.01
迁移间隔代数	5

#### 4.4 近似模型验证

近似模型误差分析选取  $R^2$  来衡量其与样本点符合的程度。 $R^2$  值越高越好, 上限为 1, 一般最低标准为 0.9。图 4 表示模型与仿真值之间的误差大小,  $R^2$  为 0.97454, 具有较高的可信度。

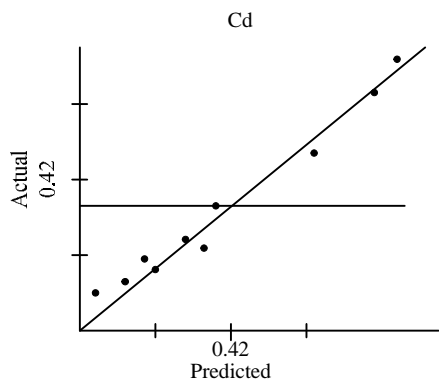


Figure 4. Error analysis  
图 4. 误差分析

经多岛遗传算法以 RBF 近似模型为适应度函数优化求得最优解, 最优解的三个参数为  $L=350\text{mm}$ ,  $a=10^\circ$ ,  $b=10^\circ$ , 优化后的阻力系数  $Cd=0.3090$ 。在 Star-ccm+ 中进行模拟仿真求得该最优解对应的 Cd 值为 0.3048, 优化结果与数值模拟的结果相差 1.4%, 在 5% 以内, 因此整个优化流程可信度较高。优化后的气动阻力系数相较于初始模型的 0.3273 降低了 6.9%, 故优化后达到了较好的减阻的效果。

#### 4.5 优化结果分析

对改型后的初始模型和最优解模型的速度云图进行对比。下图从上到下依次为取距离对称面  $X=0\text{m}$ 、 $X=0.3\text{m}$ 、 $X=0.5\text{m}$  三个尾部截面速度矢量图。

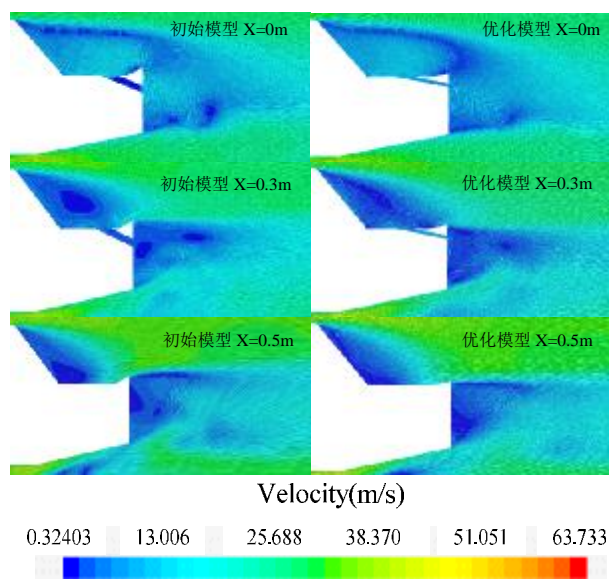


Figure 5. Velocity cloud of the longitudinal plane of symmetry of the car

图 5. 汽车纵向对称面的速度云图

先从整体上分析两模型尾部流动: 从图 5 中可看出, 初始模型和优化后的模型来说, 从侧风窗的来流因失去附着内卷, 在后风窗与行李箱夹角上方都形成了很强的涡流。气流从车顶流出后失去了支撑, 在后风窗处发生了分离, 而后备箱上面的气流发生了向后风窗处回流的现象, 然后和车顶的气流汇合向车尾流去。类尾翼结构也将气流引向了远离车尾的方向使之与车顶分离流汇合流向车尾后方, 减少了流向尾部端面的气流。对比三个截面图还可以发现: 尾涡会慢慢形成于尾部端面, 越贴近  $X=0.3\text{m}$  的截面, 两模型尾部涡流尺度和强度都会越强。

从细节上来看：对比两模型速度矢量图可知，在 X=0m 图中，由于初始模型空腔较大，在其内部产生了涡流，不但没能起到导流的作用，还降低了空腔内气流的流动速度，形成了滞留区。而相对于优化模型，空腔将尾部端面的气流很好的导向了后风窗区域，流动十分流畅，并抑制沿着尾部端面向下的气流和车底上卷的气流的混合，因此优化后尾部端面下方的涡流更小。

对比 X=0.3m 图可知，在后风窗内卷形成的拖拽涡的影响下，两模型下卷气流均在尾部端面产生两个涡旋。正是因为优化后空腔良好的导流作用，由空腔回流到尾部的气流速度大于后风窗处的流速，后风窗处涡流中心的位置被抬高，又受到车顶分离流的压迫使其宽度变得扁平，也远离了尾部行李箱，减小了行驶阻力。初始模型类尾翼倾角过大使尾部端面上方形成的涡流强度大于优化后的模型，并扩大了尾流分离区，增加了能量的损失。在 X=0.5 图中，可知涡核被抬高之后，右侧涡流没有左侧涡流强烈和明显，表明涡流的产生和发展受到了延缓和抑制。因为来自侧面的气流在后窗底部形成的一对旋涡，它决定了后窗的涡流区域和强度<sup>[10]</sup>。而优化的尾部结构形成的对涡强度减小，使得后窗整个涡流区域和强度减小。

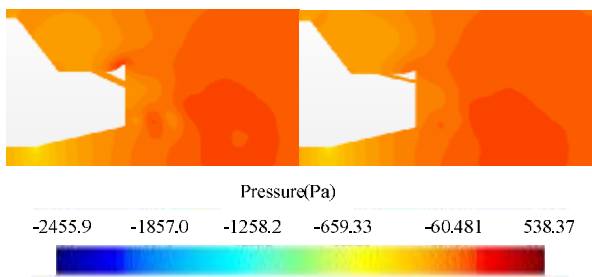


Figure 6. Pressure cloud diagram of a car's longitudinal symmetry plane

图 6. 汽车纵向对称面的压力云图

从图 6 来看左图由于类尾翼结构倾角较大，使得此处压力梯度较大，而尾部空腔的导流作用不明显，尾部气流波动剧烈，使得尾流区域压力变化较为明显。

为了更清晰的了解优化后模型表面气流的流动，生成汽车表面速度积云图，最终效果如图 7 所示。

从图 7 可以清楚地发现：优化后的模型（右）在后风窗和车尾部端面区的低速区增大，根据伯努利定律可知尾部速度降低，压力将上升，进而汽车前后压

差阻力减小，气动阻力也随之减小。回流的气流流动为后风窗斜面的流动增加了能量，一定程度上阻止了侧风窗向后翻卷的气流，减缓了拖拽涡的形成，降低了拖拽涡的强度，同时使涡流远离了车身尾部，从而降低了由拖拽涡引起的诱导阻力。对于初始模型（左）而言，从底部的气体在尾部向上翻卷与车顶分离流在车尾端面处形成了两个旋涡。但经过优化后尾部端面气流开始由空腔回流，阻碍了涡流的形成，从而减小尾部旋涡的尺寸。

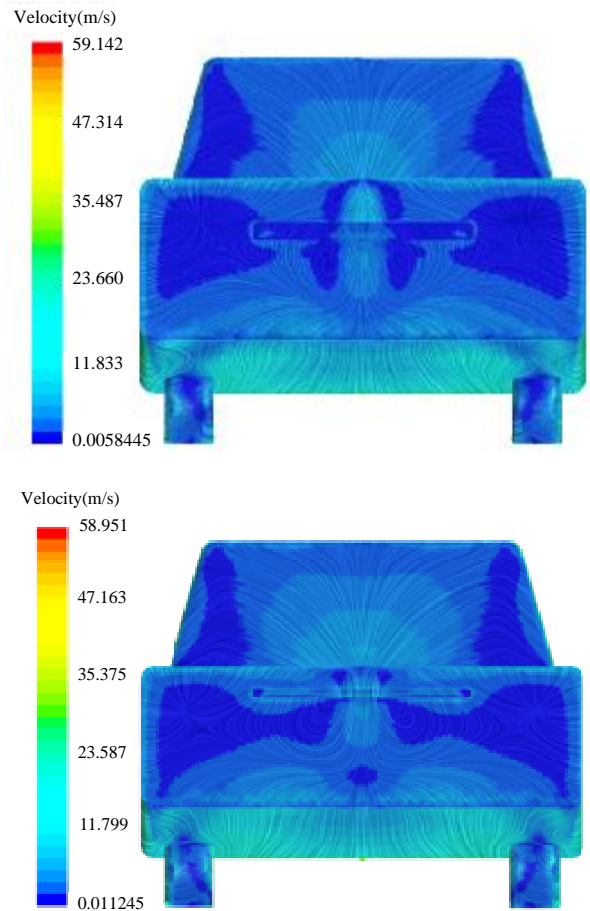


Figure 7. Body surface speed cloud

图 7. 车身表面速度云图

再从对称面湍动能云图角度来看，由图 8 可知：两模型汽车尾部的气流因与汽车表面分离，形成了复杂的湍流流动，从而使得尾部流体湍动能较大，湍流耗散率也相对较大，增加了气动阻力系数。对初始模型进行优化之后，汽车尾部端面和车底来流汇合区域因为改型后尾部结构的两次分流作用使得湍动能明显减少。涡流强度和宽度降低，减少能量耗散，汽车的

气动阻力系数也随之降低，达到了减阻优化效果。

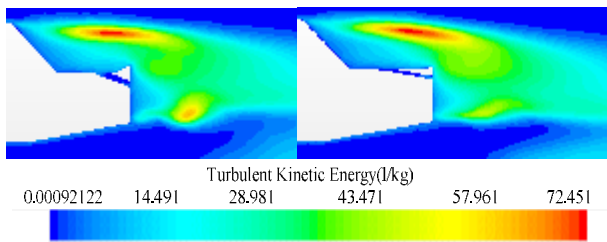


Figure 8. Turbulence Energy Cloud Diagram of a Vehicle's Longitudinal Symmetry Plane

图 8. 汽车纵向对称面的湍动能云图

综上所述,优化后的的类尾翼倾角合理地将车顶分离流导向远离尾部的下游,车尾端面气流向空腔内流动使后风窗和车尾端面处涡流区域减小。因以上两因素的作用,有效减小了尾流区域,缓和了气流的上下扰动,达到了降低气动阻力的效果。

## 5 结论与展望

(1) 在所选的各参数样本点中,经过 RBF 代理模型和多岛遗传算法的优化,降低了尾部改型后汽车模型的气动阻力,最优参数为:  $L=350\text{mm}$ ,  $a=10^\circ$ ,  $b=10^\circ$ 。最优阻力系数  $C_d=0.3048$ ,相较于初始模型减阻幅度达到 6.9%。

(2) 如若不考虑改型后的尾部结构对汽车后备箱大小的影响,则此尾部结构可以有效提高汽车的气动性能。

对于今后拥有前后两个后备箱的电动车,可以牺牲部分后备箱空间来降低气动阻力。

(3) 因初次研究此尾部结构,还有诸多因素未考虑在内,以后需要更进一步更细致的研究此尾部结构对其他性能的影响。例如:对气动升力系数影响,对雨天后风窗雨水附着、尾部泥土附着、空气流经尾部空腔产生的噪音等影响。

(4) 运用仿真与优化软件相结合的方式在汽车气动性能的研究上有着很大的应用前景,大大降低设计周期。

## 致谢

国家自然科学基金(51305472)

## References (参考文献)

- [1] 谷正气. 汽车空气动力学[M]. 人民交通出版社, 2005.  
Zhengqi Gu. Automotive Aerodynamics[M]. China Communications Press, 2005.
- [2] 张甫仁, 张金龙, 王成杰. 汽车尾部结构参数对尾部流场的影响研究[J]. 机械设计与制造, 2015(3):94-97.  
Furen Zhang, Jinlong Zhang, Chengjie Wang. Study on the Effect of Automobile Tail Structure Parameters on the Tail Flow Field[J]. Mechanical Design & Manufacture, 2015(3):94-97.
- [3] 赖宇阳. Isight 参数优化理论与实例详解[M]. 北京航空航天大学出版社, 2012.  
Yuyang Lai. Detailed Explanation of Theory and Example of Isight Parametric Optimization[M]. Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2012.
- [4] 吴军, 谷正气, 钟志华. SST 湍流模型在汽车绕流仿真中的应用[J]. 汽车工程, 2003, 25(4):326-329.  
Jun Wu, Zhengqi Gu, Zhihua Zhong. Application of SST Turbulence Model in Simulation of Vehicle Flow Simulation[J]. Automotive Engineering, 2003, 25(4): 326-329.
- [5] 于学兵, 甄华翔. RNG  $\kappa$ - $\epsilon$  与 SST  $\kappa$ - $\omega$  模型在汽车外流场计算中的比较[J]. 汽车科技, 2007(6):28-31.  
Xuebing Yu, Huaxiang Zhen. Comparison of RNG  $\kappa$ - $\epsilon$  and SST  $\kappa$ - $\omega$  Models in the Calculation of Automotive External Flow Fields[J]. Automobile Science and Technology, 2007(6):28-31.
- [6] 谷正气, 姜波, 何忆斌, 等. 基于 SST 湍流模型的超车时汽车外流场变化的仿真分析[J]. 汽车工程, 2007, 29(6):494-496.  
Zhengqi Gu, Bo Jiang, Yibin He, et al. Simulation Analysis of Vehicle External Flow Field Changes During Overtaking Based on SST Turbulence Model[J]. Automobile Engineering, 2007, 29(6):494-496.
- [7] 杨瀚博, 胡兴军, 安阳. 基于顶部与侧部扰流器的轿车气动减阻[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2015, 36(5):504-508.  
Hanbo Yang, Xingjun Hu, Yang An. Aerodynamic drag reduction of passenger cars based on top and side spoiler[J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition), 2015, 36(5):504-508.
- [8] 陈国栋. 基于代理模型的多目标优化方法及其在车身设计中的应用[D]. 湖南大学, 2012.  
Guodong Chen. Multi-objective Optimization Method Based on Agent Model and Its Application in Vehicle Body Design[D]. Hunan University, 2012.
- [9] 肖立峰, 张广泉, 张以都. 基于 Kriging 代理模型的结构形状优化方法[J]. 机械设计, 2009, 26(7):57-60.  
Lifeng Xiao, Guangquan Zhang, Yidu Zhang. Structural Shape Optimization Method Based on Kriging Agent Model[J]. Machine Design, 2009, 26(7):57-60.
- [10] 傅立敏, 刘锡国. 典型汽车尾流结构的研究[J]. 汽车工程, 1996(6):343-347.  
Limin Fu, Xiguo Liu. Research on the Typical Automobile Wake Structure[J]. Automobile Engineering, 1996(6): 343-347.