

# 基于遗传算法的带内流低阻车身气动优化

李启良<sup>1,2</sup>, 杜文海<sup>1,2</sup>, 李璇<sup>1,2</sup>, 杨志刚<sup>1,2,3</sup>, 陈羽<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804; 2. 上海市地面交通工具空气动力与热环境模拟重点实验室, 上海 201804;  
3. 北京民用飞机技术研究中心, 北京 102211)

**摘要:** 通过建立 18 个参数的参数化模型, 并开发了基于遗传算法的全局优化方法, 展开带内流的车身气动优化, 获得了气动阻力系数为 0.261 的低阻优化外形。比较最优车身的仿真和试验结果发现, 气动阻力系数仅相差 4%, 表面压力系数和不同截面速度分布趋势相同、量值相差较小, 表明所采用数值仿真方法是正确、可行的。利用本征正交分解对车身尾部截面流场进行能量分解发现, 前 9 阶模态占总能量的 54.5%; 能量占比最高的 1 阶模态呈现出尾部拖曳涡的形态, 并且拖曳涡的涡核位置不随时间变化而变化。建立了带内流的全局优化方法, 获得了经试验验证的带内流低阻车身, 为相关产品开发提供借鉴方法和外形参考。

**关键词:** 遗传算法; 内流; 低阻车身; 气动优化; 本征正交分解  
**中图分类号:** U467.1 **文献标志码:** A

## Aerodynamic Optimization of Low-drag Vehicle with Internal Flow Based on Genetic Algorithm

LI Qiliang<sup>1,2</sup>, DU Wenhai<sup>1,2</sup>, LI Xuan<sup>1,2</sup>, YANG Zhigang<sup>1,2,3</sup>, CHEN Yu<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Key Lab of Vehicle Aerodynamics and Vehicle Thermal Management Systems, Shanghai 201804, China; 3. Beijing Aeronautical Science & Technology Research Institute, Beijing, 102211, China)

**Abstract:** A parametric model of 18 parameters was established and a global optimization method based on genetic algorithm was developed. The aerodynamic optimization of the vehicle body with internal flow was carried out and a low-drag optimization shape with aerodynamic drag coefficient of 0.261 was obtained. Comparing the results of numerical simulation and test, it is found that the difference in aerodynamic drag coefficient is only 4%. The surface pressure coefficient and different cross-section velocity contours have the same distribution and small difference of

magnitude, which indicates that the numerical simulation method is correct and feasible. Through the energy decomposition of the flow field in the tail section using the Proper Orthogonal Decomposition, it can be observed that the first nine modes occupy 54.5% of the total energy. Among them, the first-order mode with the highest energy shows the shape of the tail drag vortex and its vortex position does not change with time. In this paper, the global optimization method of the vehicle with internal flow was established, and the low-drag model with internal flow was validated by test, which can provide a method and reference for the development of related products.

**Key words:** genetic algorithm; internal flow; low-drag model; aerodynamic optimization; proper orthogonal decomposition

汽车在行驶过程中受到的气动阻力与车速的平方大致成正比, 所消耗的功率和燃油与车速的立方大致成正比<sup>[1]</sup>。由此可见, 降低汽车气动阻力意味着油耗的减少, 对改善当前空气质量有着十分重要的意义。

为了获得更低气动阻力, 国内外研究人员开发了不同优化方法并将其应用于车辆开发中。国外的 Georgios 等<sup>[2]</sup>发展了以气动阻力、升力为目标函数, 以稳态雷诺平均法 (Reynolds average Navier-Stokes, RANS) 或瞬态分离涡模拟 (detached eddy simulation; DES) 仿真结果为输入, 能够应用于大量设计变量的连续伴随优化方法。Ando 等<sup>[3]</sup>发展了包括流动计算、网格变形和优化算法的气动优化设计方法。该方法能够在一个星期内完成 12 个参数的气动优化。Song 等<sup>[4]</sup>采用神经网络模型对 SONATA 尾部造型进行了气动优化。通过选择 6 个设计变量,

收稿日期: 2017-05-16

基金项目: 上海市地面交通工具风洞专业技术服务平台(16DZ2290400)

第一作者: 李启良(1980—), 男, 工学博士, 副研究员, 博士生导师, 主要研究方向为汽车空气学与气动噪声。

E-mail: qiliang@tongji.edu.cn

通讯作者: 陈羽(1986—), 男, 工学博士, 主要研究方向为汽车空气动力学与高速列车气动噪声。E-mail: yu.chen@tongji.edu.cn

利用D型优化算法产生64个样本点,获得优化模型的气动阻力系数比基础模型降低5.6%。Lundberg等<sup>[5]</sup>通过神经网络和进化优化方法全自动进行汽车外形优化,得到最优模型的气动阻力比原始模型降低13%。国内的汪怡平等<sup>[6]</sup>将自由变形技术引入汽车气动优化中,采用Kriging模型构建近似模型,利用多岛遗传算法求解近似模型的最优值,得到最优轿车模型气动阻力系数比基础模型降低4.1%。杨易等<sup>[7]</sup>基于近似模型对后扰流器进行气动优化,优化后的可变扰流器可使整车在高速行驶工况下气动阻力系数减少3.3%,气动升力系数减少22.4%。

理想低阻外形也受到国内外研究人员的重视。早期的Hucho<sup>[8]</sup>基于“半车身”和“旋转体”等理论设计出气动阻力极低的车身体形。近年的何忆斌等<sup>[9]</sup>参考飞机翼型截面设计理论构建了一个具有低阻力的车身体形。所在课题组在过去几年开展一系列研究,得到气动阻力系数仅为0.059的三维无轮低阻车身和造型风格各异的低阻基本形<sup>[10-11]</sup>。开发了分步遗传算法,在此基础上添加内部空间约束算子,实现气动和内部空间的自动协同优化,可以在较短时间内给出满足不同内部空间要求的低阻车身<sup>[12-13]</sup>。

回顾过去研究发现,所有优化研究均不考虑内流的影响,参数化建模和遗传算法相结合的气动优化方法仍未广泛应用于低阻车身的开发。为此,本文将基于遗传算法开展带内流低阻车身气动优化研究,建立气动优化方法获得低阻车身外形,为相关研究提供参考。

## 1 气动优化方法

### 1.1 参数化模型

建立如图1所示的参数化模型。车长、宽和高分别为4 600、1 750和1 480 mm。图1a所示的侧视图共有11个控制点,1~6为半自由点,7~11为过渡点。通过18个参数来控制11个点的坐标,应用1~100的整数对参数进行编码。图1b的俯视图和图1c的横截面图均由4个参数控制5个控制点的坐标,也应用1~100的整数对其进行编码。

利用Matlab软件,将点、线代码文件导入到Gambit软件中批量生成车身几何。使用Catia软件对车身几何进行处理,生成三维无轮车身。基于某品牌-荣威350轮胎、轮腔和轮轴距等基本尺寸,将其添加到三维无轮车身上。轮胎型号为215/65R15,轮距和轴距分别为1 537和2 650 mm,如图2a所示。

按照文献<sup>[14]</sup>建立内流简化方法将内流部件添加到三维无轮车身上,如图2b所示。尽管相同级别不同品牌轿车冷却系统有所不同,但是他们的阻力特性差异很小,因而本研究的内流的冷却部件阻力特性选取荣威350的阻力特性试验数据。

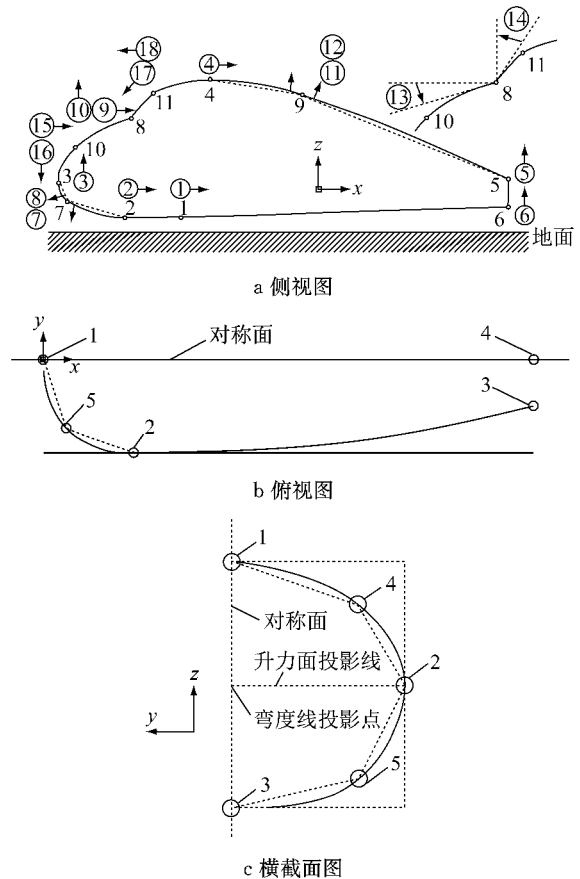


图1 参数化模型

Fig.1 Parametric model

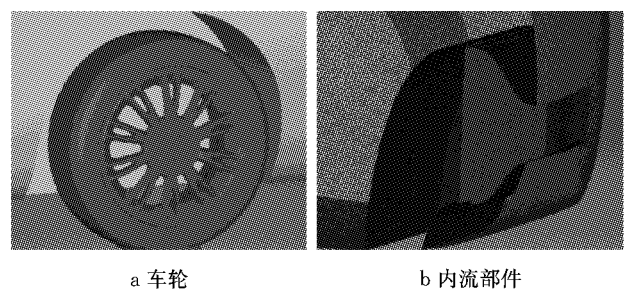


图2 车轮与内流部件

Fig.2 Tire and inner flow component

### 1.2 气动仿真设置

由于三维模型左右对称,为了减少计算时间,进行半车的气动计算。计算域的长、宽和高分别为9倍车长、5倍车宽和4倍车高。半车模型放置在地面上,车头距离计算域的进口3倍车长。使用软件Hypermesh进行计算域内部件面网格的生成,车身

外表面网格大小为 10 mm, 车轮和内舱部件的网格大小均为 8 mm. 整个计算域共创建 78 万个面网格. 使用 Tgrid 软件生成四面体网格, 并在车身所有壁面和地面布置边界层网格. 为了能够更精确地模拟整车流动情况, 在车身内舱、底部和尾部分别设置了三个加密区, 总的体网格数约为 1 600 万个.

在计算域入口为速度入口, 速度为  $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . 出口采用压力出口, 车轮和地面设定为壁面, 侧面和顶面设为对称面, 冷却模块设置为多孔介质. 使用 Fluent 框架内的 Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型和非平衡壁面函数进行模型气动计算<sup>[15]</sup>. 所有算例先采用一阶格式计算 1 000 步, 然后采用二阶格式计算 5 000 步. 当残差降到  $10^{-4}$  且监测到气动阻力系数  $C_d$  值没有明显变化时, 可以认为计算结果收敛.

### 1.3 遗传算法

遗传算法的优化过程模仿生物进化的过程, 有很好的鲁棒性, 可以求得全局优化中的最优解, 一般使用在非线性问题. 图 3 为遗传算法操作的流程图. 他包含种群生成、适应度评估、选择、交叉和变异等.

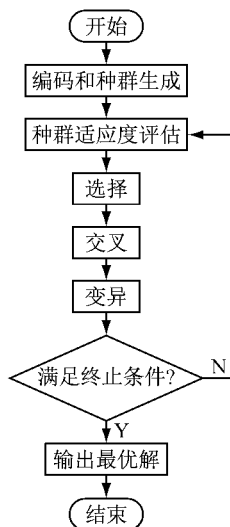


图 3 遗传算法流程图

Fig. 3 Genetic algorithm flow chart

## 2 试验方法

取三维车身优化过程中获得气动阻力系数最小的车身外形进行模型风洞试验. 模型风洞喷口面积为  $0.123 \text{ m}^2$ . 基于堵塞比小于 12% 的原则确定制作 1:12 的缩比试验模型, 他的长、宽和高分别为 383、145 和 123 mm. 试验模型由车身上表面壳体、车身下表面平板、车头格栅开口活动件和 4 个车轮组成, 他们由 ABS 树脂材料加工而成. 车头的格栅开口活

动件便于给模型安装内舱部件. 车身和车轮由螺栓连接, 并通过 4 个支撑柱将车轮和试验段下面的天平连接起来, 如图 4 所示. 由于经缩比后的轮辋尺寸太小而无法加工, 为此在保证通气面积相等前提下, 更换轮辋造型. 内流部件按照进气量和阻力相等前提下, 更换成多孔板, 孔径为 3 mm, 孔间距 4.9 mm, 共 32 个.

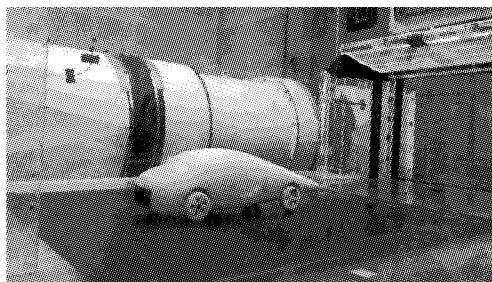


图 4 缩比试验模型

Fig. 4 Scale test model

采用六分量气动天平测量模型气动阻力. 在车身中截面不同位置布置不锈钢毛细管, 并通过软管与压力传感器相连来测量车身表面静压. 使用粒子图像测速法 (particle image velocimetry, PIV) 测量车身 3 个截面 ( $L$  为车长), 如图 5 所示.

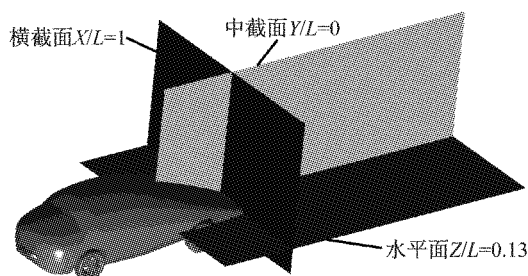


图 5 PIV 试验截面

Fig. 5 Sections of PIV test

试验首先测量了喷口速度为  $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的气动阻力, 然后再测量车身表面压力, 最后才通过 PIV 获得不同截面速度分布.

## 3 结果分析与讨论

### 3.1 气动优化过程与结果

三维车身的侧视图由 18 个参数点控制, 每个参数值用 1~100 进行编码, 1 和 100 分别是每个参数变化后控制点的极端位置. 首先运用优化拉丁方<sup>[16]</sup>的取样方法, 生成第一代 36 个样本点. 分别对每个样本点生成面网格和体网格, 由于外形差异较小, 他们的网格数差异很小. 通过相同的计算设置并最终

通过 Fluent 软件计算得到第一代各样本点的气动阻力系数,如图 6a 所示。

从图 6a 可见,各样本点气动阻力系数处于 0.263~0.376 之间,他们的平均值为 0.311。有 22 个样本点小于 0.311,有 14 个样本点大于 0.311,样本点分布不均匀。气动阻力系数最小位于样本点 11,次最小位于样本点 10,各代父代样本参数如表 1 所示。为此将其作为第二代的父代,通过遗传算法的交叉变异得到下一代 18 个样本点。经计算得到图 6b 所示样本点的气动阻力系数。

从图 6b 可以看出,各样本点气动阻力系数处于 0.261~0.285 之间,他们的平均值为 0.271。与第一

代相比,平均值下降了 0.040,下降幅度较大。有 10 个样本点气动阻力系数小于 0.271,有 8 个样本点气动阻力系数大于 0.271,可见,样本点分布较均匀。从第二代气动阻力系数最小的样本点 7 和次最小的样本点 5 作为第三代的父代,通过遗传算法的交叉变异得到下一代 9 个样本点。经计算得到图 6c 所示的样本点气动阻力系数。

从图 6c 可以看出,各样本点气动阻力系数主要集中在 0.262~0.270 之间,他们的平均值为 0.266,仅下降 0.005,下降幅度非常小。分别有 4 个样本点小于和大于 0.266,样本点分布均匀,继续迭代优化空间已不大。

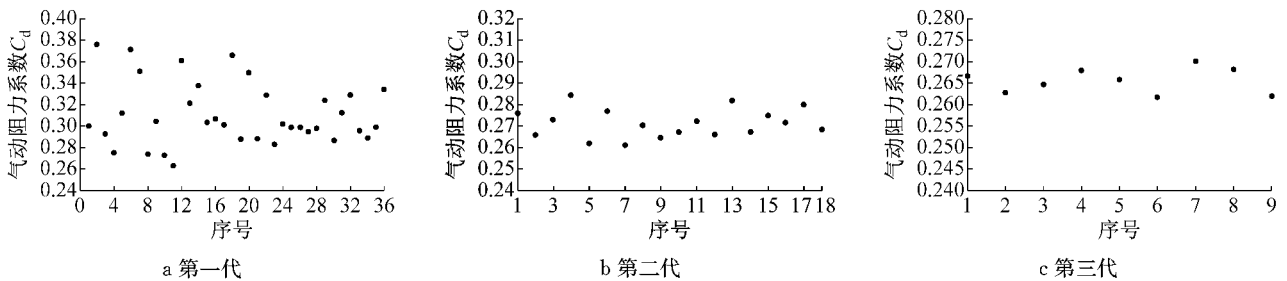


图 6 各代样本点气动阻力系数

Fig.6 Drag coefficient of each generation sample point

表 1 各代父代样本参数

Tab.1 Parent sample parameter of each generation

	序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
第一代	10	27	69	64	48	58	100	84	58	37
	11	42	62	4	42	21	100	73	25	15
第二代	5	28	68	7	43	50	100	78	37	37
	7	39	64	58	44	23	100	75	48	32
	序号	10	11	12	13	14	15	16	17	18
第一代	10	66	17	17	100	64	1	67	100	27
	11	79	1	69	42	11	32	26	69	76
第二代	5	71	6	69	85	47	11	52	82	37
	7	74	2	44	48	44	24	65	77	30

通过以上气动优化过程,最终选定第二代样本点 7 作为气动阻力系数最小的样本点。后续将对其外形进行仿真和试验研究。

### 3.2 优化车型仿真与试验对比

#### 3.2.1 气动力与压力

为了与试验进行比较,建立与试验相同的仿真模型并进行气动计算,计算得到其气动阻力系数为 0.267,比全尺寸优化模型气动阻力系数大 0.006。该速度下试验得到气动阻力系数为 0.278,数值仿真误差约为 4%,处于可接受范围内。

图 7 给出车身中截面测点压力系数  $C_p$  的试验值和仿真值。从图中能清楚看出,试验值和仿真值的趋势相同,量值相差较小。

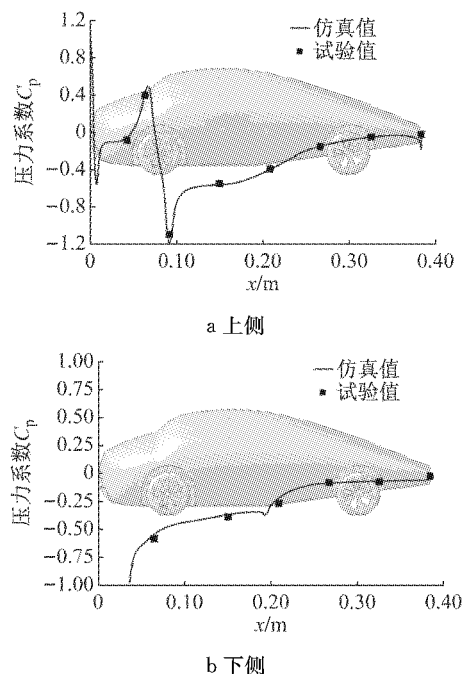


图 7 中截面压力系数对比

Fig.7 Comparison of pressure coefficient at middle plane

#### 3.2.2 流场对比

图 8 显示了车身中截面  $Y/L=0$ 、横截面  $X/L=1.00$  和水平面  $Z/L=0.13$ ,试验和仿真的速度云图

对比. 在中截面  $Y/L=0$ , 仿真与试验云图均在车尾后方有涡流, 速度分布较为相似. 试验云图显示尾部死水区较小, 仿真云图尾部拖曳涡较长、死水区较大. 横截面  $X/L=1.00$  恰好在车身切尾的位置, 试验和仿真云图均显示高速区和低速区的范围大致相

同, 均在车尾后方有 2 个拖曳涡, 分布在车尾左右的两端, 由于气流下洗作用使得涡流上方的速度较大, 下方的速度较小. 水平面  $Z/L=0.13$  的仿真与试验云图分布非常相似, 可明显看到车尾部两端的两个拖曳涡.

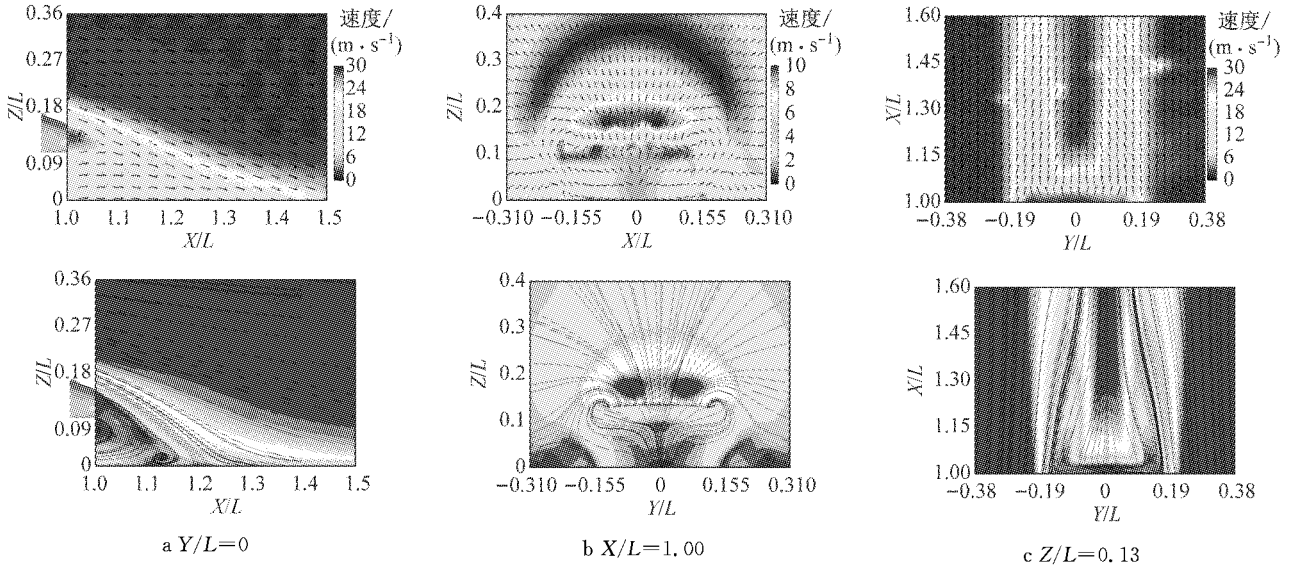


图 8 不同截面速度云图对比(上:试验,下:仿真)

Fig.8 Comparison of velocity contour at different sections(up:test,down:CFD)

### 3.2.3 本征正交分解

本征正交分解方法能够从能量角度对车身尾部流场进行分解, 得到各阶模态所占能量比, 进而识别出流动中存在的大尺度拟序结构. 图 9 分别由前 1 000 帧图片和前 500 帧图片计算得到各阶模态的能量占比. 从图中可以看出, 前 500 帧图片的能量分布基本与前 1 000 帧一致, 故 1 000 帧图片得到的分析结果已满足收敛要求; 第 1 阶模态的能量占比最高且为 11%, 前 9 阶模态的能量占比总和为 54.5%, 占据一半以上的能量.

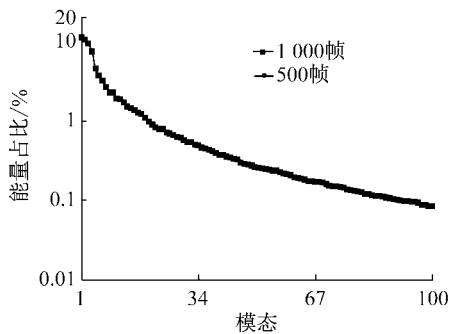


图 9 前 100 阶模态的能量分布图

Fig.9 Energy distribution of the first 100 order modes

对尾迹区横截面  $X/L=1.00$  的 1000 帧图片进行本征正交分解分析. 图 10 为 1 阶模态进行重构后

得到的 4 个瞬时刻的涡量图. 从图中可以看到, 从尾迹区提取的 1 阶模态呈现出尾部拖曳涡的形态. 拖曳涡涡量集中的位置不随时间发生明显变化, 说明拖曳涡在给定横截面上没有上下震荡的现象.

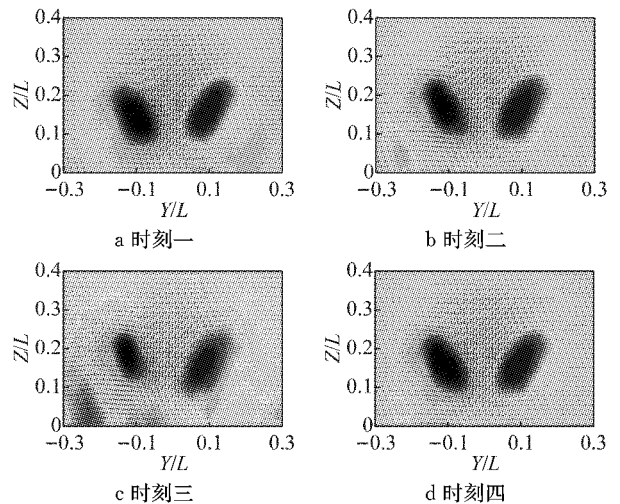


图 10 基于 1 阶模态重构流场的涡量图

Fig.10 Vorticity diagram of reconstructed flow field based on the first mode

## 4 结论

通过数值仿真和试验相结合方法开展基于遗传

算法的带内流低阻车型气动优化研究,得到以下结论:

建立 18 个参数的参数化模型,使用遗传算法实现了带内流低阻车型气动优化,获得气动阻力系数为 0.261 的优化车身。

基于低阻优化车身开展气动仿真和试验测量发现,两者气动阻力系数相差 4%,车身中截面压力系数和不同截面的速度分布趋势、量值相差较小,表明采用的数值仿真方法是正确、可行的。

通过本征正交分解方法发现,前 500 帧的能量分布基本与前 1 000 帧相同,前 9 阶的能量占比超过 50%。1 阶模态重构出来的涡量集中位置不随时间变化而变化,拖曳涡在给定截面无上下震荡现象。

### 参考文献:

- [1] 傅立敏. 汽车空气动力学[M]. 北京:机械工业出版社,2006.  
FU Limin. Automotive aerodynamics[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2006.
- [2] GEORGIOS K K, EVANGELOS M P K, THOMAS S, *et al.* Adjoint optimization for vehicle external aerodynamics[J]. International Journal of Automotive Engineering, 2016, 7(1): 1.
- [3] ANDO K, TAKAMURA A, SAITO I. Automotive aerodynamic design exploration employing new optimization methodology based on CFD [J]. Sae International Journal of Passenger Cars Mechanical Systems, 2010, 3(1): 398.
- [4] SONG K S, KANG S O, JUN S O, *et al.* Aerodynamic design optimization of rear body shapes of a sedan for drag reduction [J]. International Journal of Automotive Technology, 2012, 13(6): 905.
- [5] LUNDBERG A, HAMLIN P, SHANKAR D. Automated aerodynamic vehicle shape optimization using neural networks and evolutionary optimization[R]. SAE International in United States, 2016.
- [6] 汪怡平,王涛,黎帅. 基于自由变形技术的汽车气动减阻优化[J]. 机械工程学报, 2017, 53(9): 135.  
WANG Yiping, WANG Tao, LI Shuai. Aerodynamic drag reduction of vehicle based on free form deformation [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(9): 135.
- [7] 杨易,沈夏威,谷正气,等. 基于近似模型的可变后扰流器气动优化[J]. 中国公路学报, 2012, 25(5): 146.  
YANG Yi, SHENG Xiawei, GU Zhengqi, *et al.* Aerodynamic optimization for a variable rear spoiler based on an approximate model[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(5): 146.
- [8] HUCHO W H. Designing cars for low drag-state of the art and future potential[J]. International Journal of Vehicle Design, 1982, 3(3): 255.
- [9] 何忆斌,谷正气,李伟平,等. 汽车理想气动形体数字化模型构建及气动性能试验[J]. 航空动力学报, 2010, 25(5): 1031.  
HE Yibin, GU Zhengqi, LI Weiping, *et al.* Design of aerodynamic optimization shape digital model for car and it's wind tunnel test[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(5): 1031.
- [10] 韦甘,杨志刚,李启良. 低阻车身体形的参数化建模与气动试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(5): 769.  
WEI Gan, YANG Zhigang, LI Qiliang. A parametric modeling method of low-drag car body and aerodynamic test[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(5): 769.
- [11] 韦甘,杨志刚,李启良. 不同造型风格的车身低阻基本形体[J]. 计算机辅助工程, 2014, 23(3): 1.  
WEI Gan, YANG Zhigang, LI Qiliang. Low drag base bodies of different stylings[J]. Computer Aided Engineering, 2014, 23(3): 1.
- [12] 韦甘,杨志刚,李启良. 基于分步遗传算法的车身气动优化[J]. 吉林大学学报(工学版), 2014, 42(6): 1578.  
WEI Gan, YANG Zhigang, LI Qiliang. Aerodynamic optimization method for car body based on process costing genetic algorithm[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2014, 42(6): 1578.
- [13] 韦甘,杨志刚,李启良. 受内部空间约束的车身气动优化[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(12): 1886.  
WEI Gan, YANG Zhigang, LI Qiliang. Aerodynamic optimization method for car body under constraints of inner space[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(12): 1886.
- [14] 李璇. 基于遗传算法的带内流车身优化[D]. 上海:同济大学, 2017.  
LI Xuan. Optimization of internal flow body based on genetic algorithm[D]. Shanghai: Tongji University, 2017.
- [15] SHIH T H, LIOU W W, SHABBIR A, *et al.* A new  $k-\epsilon$  eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows: model development and validation[J]. Computers and Fluids, 1995, 24(3): 227.
- [16] MCKAY M D, BECKMAN R J, CONOVER W J. Comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code[J]. Technometrics, 1979, 21(2): 239.