

基于低风阻的电动汽车造型设计

李彦龙^{1,2}, 朱 晖¹, 杨志刚¹

(1. 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; 2. 同济大学 汽车学院, 上海 201804)

摘要: 分析了当代电动车造型整体格局, 确定了目标车型的基本参数. 基于最小阻力体气动研究, 将低阻生物作为形态仿生对象, 完成了低阻车体设计. 通过与传统车的对比研究, 确定了整车的造型风格. 之后对车头、车轮等各部位依次作了造型与气动优化, 完成了整车设计. 整个过程采用了气动、散热、人机布局、仿生等多元素耦合的研究方法, 最终得到了一款全新低阻电动汽车造型, 制作了 1:1 模型. 经风洞试验风阻系数 C_D 为 0.193, 明显优于 0.238 的预估目标值.

关键词: 汽车造型设计; 低阻造型; 电动汽车

中图分类号: U 461.2

文献标志码: A

Electric Car Design Based on Low Drag

LI Yanlong^{1,2}, ZHU Hui¹, YANG Zhigang¹

(1. Shanghai Key Laboratory of Vehicle Aerodynamics and Vehicle Thermal Management Systems, Shanghai 201804, China; 2. College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: General situation of electric car design is analyzed and basic specifications are set. Based on the body of least drag, the paper starts with a low-drag bionic shape to get the main body design. With a comparative study of the electric car and traditional car design, the style of the new car is defined. Optimization for the essential parts of the car, such as the nose, wheels and so on are developed on both design and aerodynamics. During the process, the styling, aerodynamics and thermal control are studied with coupling method. Finally a totally new low-drag electric car design is developed, as well as a full-scale hard model. The final 1:1 wind tunnel test results in a C_D of 0.193, much better than the objective of C_D 0.238.

Key words: car design; low-drag design; electric car

设计必然会有新的诉求. 同时为了进一步体现节能环保, 其低风阻化也更为必要. 为此, 各厂家在造型与空气动力学结合方面进行了多方研究.

从与传统车对照的角度看, 当代电动车造型总体上可分为三个大类:

第一类: 车体基于现有车型. 其特点是对动力系统改造而沿用了现有传统车身造型, 整体造型和传统车无明显区别, 如荣威 550E 等车型.

第二类: 整车进行颠覆性设计. 其特点是为了强调电动特性及新颖性, 形态上很注意突出“电动”特征, 相对传统车显得“另类”, 如 2009 年的雷诺 Zoe Ze Concept.

第三类: 传统车风格的新设计. 此类车介于第一类、第二类之间, 即造型虽为全新设计, 整体形态特征仍和传统车有很大相似性, 如 2009 年的特斯拉 Model S Concept.

由于 C_D (风阻系数) 的下降可直接导致能耗的下降, 各个厂家在电动车低阻化方面不遗余力, 做了很多工作.

国外关于低阻车身形态的研究较早, 美国福特“Probe”系列概念车的 C_D 从 1979 年 Probe I 的 0.25 一直下降到 1985 年 Probe V 的 0.137^[1]. 但由于此类车主要用于研究而并未量产推广.

2014 年的大众 XL1 是近年来低阻化较为出色的量产车型, C_D 仅为 0.189. 但因车身过于低矮(车高仅为 1 153 mm), 车内乘员空间十分狭小; 乘员 H 点(胯点, 即乘员躯干与大腿之间的关节点)也过低, 上下车非常不便, 因而影响了实用性.

2015 年的奔驰概念车 Concept IAA 的 C_D 为 0.19, 采用了多种主动控制方式以求减阻, 如可变长度(由 5 040 mm 伸长至 5 430 mm)、可移动前保险杠导风板(向前 25 mm, 向后 20 mm)、主动格栅以减

电动车作为未来汽车的发展趋势之一, 其造型

收稿日期: 2016-09-10

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2011CB711203)

第一作者: 李彦龙(1974—), 男, 副教授, 博士生, 主要研究方向为汽车造型设计、汽车造型策略研究和汽车造型与空气动力学.

E-mail: mail_dragon@tongji.edu.cn

通讯作者: 杨志刚(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为汽车空气动力学. E-mail: zhigangyang@tongji.edu.cn

少内流、主动轮辋饰罩(变得更平滑)等多项措施,且没有传统的后视镜(用摄像头代替)。尽管 C_D 很低,但多处主动减阻措施使得结构过于复杂,超过 5m 的车长也使得车体过于庞大。

由以上可见,各种车型固然各有优势,但也都有可改进之处,比如将电动车造型与空气动力学耦合研究而得到更优的低阻效果,同时使整车各因素之间关系更为合理,使之更具实用性和推广价值。

需要说明的是,本文基于低阻带轮车身的气动优化方法作为技术支持,重点是造型设计。车型代号定为 Aero-973。

1 车型基本定位研究

1.1 基本定位及尺寸

1.1.1 空气动力学低阻化目标

低阻化是本课题的基本要求之一, C_D 名义目标值确定为 0.25。但作为研究,由于在整车底盘、缝隙等方面做了简化,同时车轮按不旋转处理。根据经验,这几方面对 C_D 的贡献分别为:底盘 0.015, 缝线 0.005, 旋转车轮为总 C_D 的 -3%^[2], 由此可知预估目标值为

$$C_D = 0.25 - (0.015 + 0.005 - 0.25 \times 3\%) = 0.238$$

1.1.2 基本尺寸及参数

为了保证实用性,以普通的 A 级三厢轿车为参考,确定整车基本尺寸及参数如下:

表 1 电动汽车基本尺寸
Tab.1 Basic dimensions

名称	初步尺寸范围/mm	最终选取值/mm
长	4 300~4 650	4 610
轴距	2 500~2 700	2 610
宽	1 700~1 800	1 745
高	1 400~1 500	1 465
离地间隙	100~150	130
前轮距	1 400~1 450	1 400
后轮距	1 400~1 450	1 400
车轮型号	—	195/65R15
长/高	—	3.15
长/宽	—	2.64
正投影面积	1.8~2.5 m ²	2.273 m ²

1.2 整体布局及结构特点研究

整体布局对于造型效果及低阻性能有着直接影响,而电动汽车在这方面具有比传统车更明显的优势^[3]。基于“低阻化”、“A 级车”、“电动车”等几个基本条件,对整体布局及人机布置规划如下:

1.2.1 整体布局

如图 1 所示,Ⓐ 为动力单元:即电池,安置在车

身下面,形成平整的“滑板式”底盘,利于减阻,同时给其他方面的布局带来更大自由。Ⓑ 整车比例:在整车长度相当的情况下,由于动力、传动系统的结构与传统车不同,故可以加大轴距而缩小前、后悬,空间利用更为高效。Ⓒ 前脸:由于比传统车机舱的冷却需求降低,格栅面积可以减小,从而降低内流阻力。Ⓓ 头部:由于没有传统车的发动机、变速箱等总成,前机舱空间可以大大压缩,从而可以降低车头高度,利于减阻。Ⓔ 车顶最高点:可以较大幅度前移,利于减阻。Ⓕ 后部造型:由于轴距可以更大,可使得后排坐姿更趋向于平躺,头部位置相应降低,从而降低车顶后部,利于减阻。Ⓖ 尾部:由于可以采用新型式的悬架系统,可为行李箱部位让出更大空间。Ⓖ 局部遮盖:比如通过把后轮做部分遮盖,既获得新造型,又利于减阻。

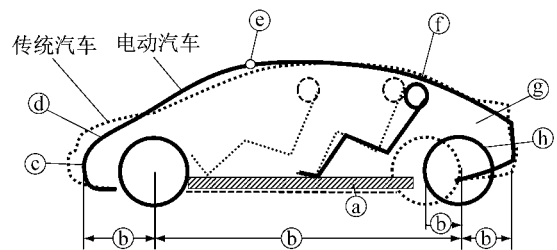


图 1 新型电动车整体布局与传统车对比

Fig.1 Basic layout comparison between new electric car and traditional car

1.2.2 乘员布局

乘员布局,如图 2 所示,对整体造型有重要影响。普通轿车会有 5 个座位,而实际坐满的时候很少。针对市场的实际应用情况,此处提出更为合适的

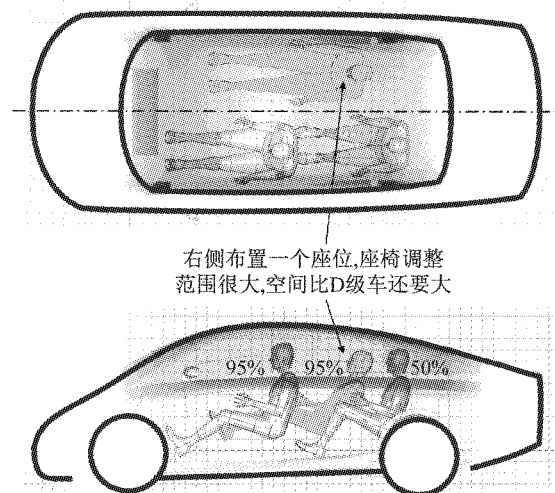


图 2 偏置 3 座布局模式

Fig.2 The offset 3-occupant layout

布局,即偏置 3 座乘员布局^[4].其特点是右侧只安置一个座位,如此调整幅度可更大,空间比 D 级车还宽敞.

2 低阻体创建及研究

2.1 视觉形态研究

很多水生动物都具有非常好的低阻形态,此处以海豚为意向(如图 3 所示),采用形态仿生学展开设计.海豚主体纵向呈梭形,横截面呈圆形,此种外形有较大的空间容积,利于向汽车形态转化.

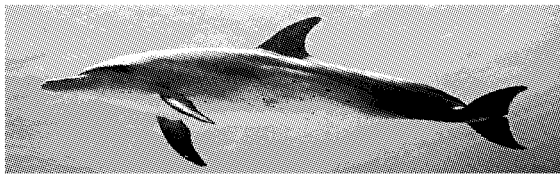


图 3 典型的低阻生物体

Fig.3 A typical low drag organism

2.2 基于遗传算法的阻力最优外形特征研究

根据课题组的研究,类车体(不含车轮等) C_D 最小可达到 0.076 左右,带车轮的凹头车体 C_D 最小可达到 0.124 左右^[5],此成果为后续低阻设计提供了依据.特别注意到此形态在整体上和造型意图也互相吻合,利于造型的开展,如图 4 所示.

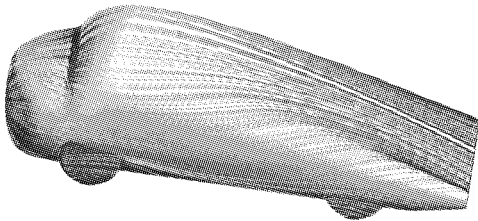


图 4 带轮低阻类车体油流图

Fig.4 Oil flow diagram of the wheeled low-drag shape

2.3 技术路线的确定

建立了低阻体及基本视觉形态之后,确定技术路线为:设定低阻体,然后完成主体造型;之后进行 CFD 优化,并逐次添加局部造型;再次进行 CFD 优化,最后进行风洞试验.分为两个大的阶段:第一阶段:主体形态设计及空气动力学优化,在低阻体基础上结合人机空间要求,进行形面、体量等方面的设计,其特点是初始风阻很低.第二阶段:局部形态设计及空气动力学优化,在整体形态风格不变的情况下,对局部曲面(如拐角等),以及格栅、后视镜、流道等进行优化.

3 造型研究及气动优化

3.1 整车主体造型研究

3.1.1 基本参数的确定

综合低阻体研究结论及形态意向、造型、人机空间等,确定初步主体形态如图 5 所示,并选取基本尺寸如下:

长×宽×高=4 343 mm×1 797 mm×1 449 mm;轴距 2 500 mm

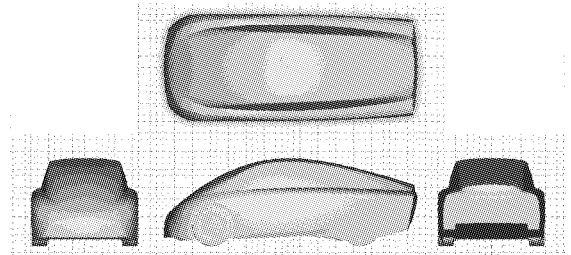


图 5 主体形态设计

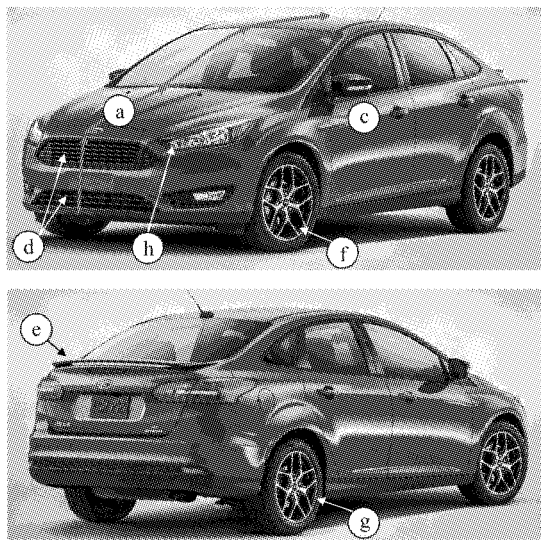
Fig.5 The main body design

3.1.2 电动车造型风格定位研究及设计

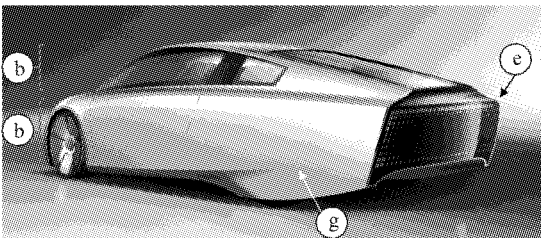
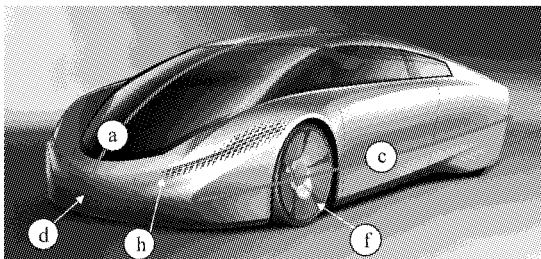
电动车的技术特点是布局更为自由,利于使汽车整体架构发生变革.加之对低阻化的诉求,在造型风格上也可以借此突破.传统汽车的造型变化在整体上体现为“新车款”,而电动汽车则可以体现为“新车种”,具体对比如表 2 及图 6 所示.

表 2 电动汽车与传统汽车造型风格对比
Tab.2 Styling comparison of electric car and traditional car

利于低阻化的电动汽车造型风格	不利于低阻化的传统汽车造型风格
a. 因架构相对固化,故整体形态难以突破,形态过渡转折明显,不利于低阻化	因架构更自由,故整体上易有更大突破,形态过渡流畅,利于低阻化
b. 整车形态构成为:机舱+客舱+尾舱=三厢式,整车往往为非低阻体	整车形态构成为:下车身+上车身=低阻体 1+低阻体 2,整车仍为低阻体
c. 曲面特征起伏不平	曲面特征平整顺畅
d. 较大的格栅以满足发动机散热,内流较大	较小的格栅即可满足电池散热,内流较小
e. 尾部通过增加扰流板等套件减阻	尾部通过“切尾造型”即可有效减阻
f. 轮辐起伏强烈	轮辐平坦
g. 后轮外露,运动感更强	后轮包覆,整体感更强
h. 车灯仍以传统组合式为主,灯罩往往凸出于车体	车灯用分散 LED 技术,造型更自由且贴合车体
i. 整体上是“新车款”	整体上是“新车种”



a 典型的传统汽车造型



b Aero-973 电动汽车造型

图 6 电动汽车与传统汽车整体造型对比

Fig.6 Contrast of design between an electric car and a typical traditional car

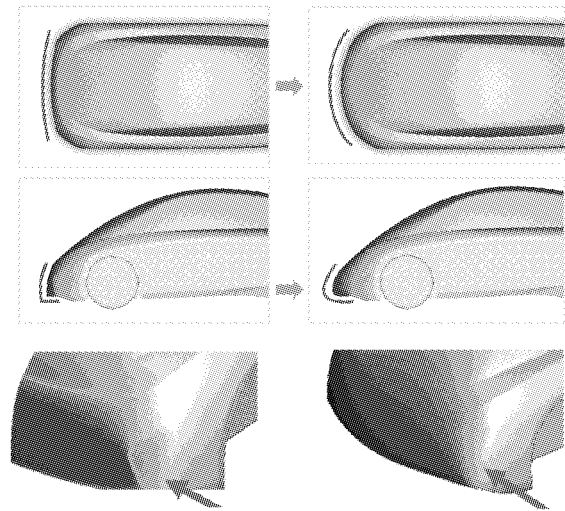
3.2 局部造型设计及空气动力学优化

3.2.1 车头部分

原方案的车头比较平直,转折明显,见图 7a. 将车头在俯视、侧视两个方向都调整为更加圆滑、平顺,见图 7b. 经 CFD 仿真, C_D 由 0.196 下降为 0.189, ΔC_D 为 -0.007.

3.2.2 车轮

将轮辋的简化平板造型细化为具有轮辐的真实造型,见图 8. 简化车轮由于没有轮洞,由车身侧面经轮腔边缘进入轮腔内部的气流被阻塞,增加了气动阻力. 真实车轮中,由车身侧面经轮腔边缘进入轮腔内部的气流由辐条间隙流出轮腔,从而风阻更小. 此效应使 C_D 由 0.189 下降为 0.184, ΔC_D 为 -0.005.

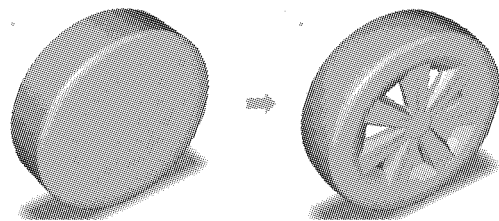


a 优化前

b 优化后

图 7 车头优化

Fig.7 Optimization of the nose



a 简化车轮

b 真实车轮

图 8 电动汽车与传统汽车整体造型对比

Fig.8 A typical low drag organism

3.2.3 车长及车尾

如图 9 所示,尾部延长,车长由 4 343 mm 增至 4 618 mm,特别是车尾(后翼子板部分)更加向中央内收. 图 9c 为优化前,9d 为优化后. 优化后尾部紊流区明显减小,尾部表面压力明显增加, C_D 由 0.184 降至 0.160, ΔC_D 为 -0.024.

3.2.4 轴距调整

由于增加了总长,轴距也得以由 2 500 mm 加长至 2 610 mm. 此举既使整体比例更佳,也可以加大内部乘员空间,见图 10. 同时由于车尾内收,后轮距也相应由 1 444 mm 降至 1 434 mm. 经 CFD 仿真, C_D 由 0.160 增至 0.160 5, ΔC_D 仅为 +0.000 5.

3.2.5 车顶

通过人机分析,发现后排头部空间不足,为此在保持整车最高点不变的前提下,车顶后部加高 50mm 左右,并与车顶最高点及车尾顺接. 经 CFD 仿真, C_D 由 0.160 5 增至 0.161 5, ΔC_D 为 +0.001. 虽略有增加,但却大大改善了实用性,如图 11 所示.

3.2.6 后视镜

在满足尺寸标准的前提下,后视镜造型保持了

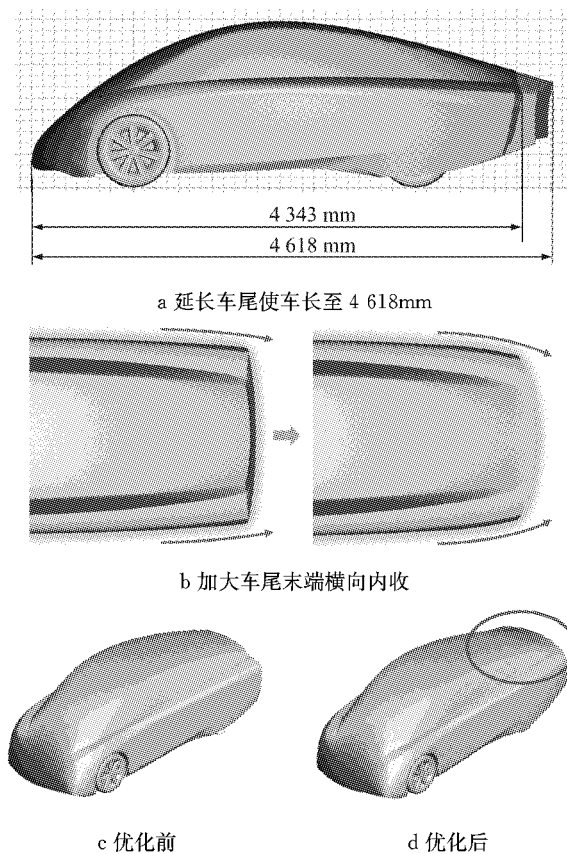


图 9 车身长度及尾部形状调整

Fig.9 The adjustment of length and tail shape

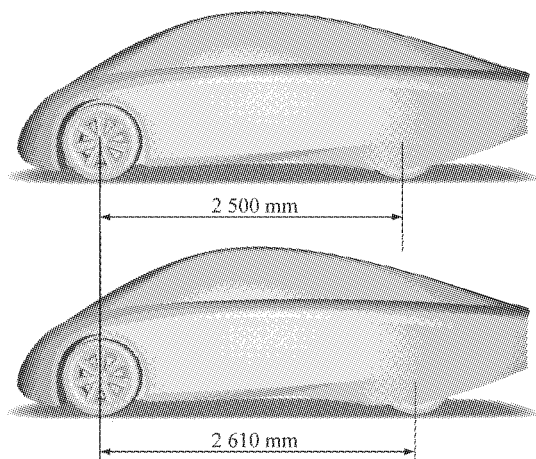


图 10 轴距加长至 2 610 mm

Fig.10 The wheelbase added to 2 610 mm

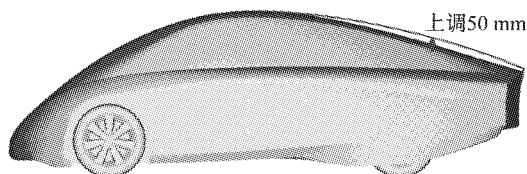


图 11 车顶后部增高 50 mm

Fig.11 The height at rear roof added by 50 mm

流畅的风格, 支座截面造型近似水滴形以求降低风

阻, 如图 12 所示. 经 CFD 仿真, C_D 由 0.161 5 增至 0.174, ΔC_D 为 +0.012 5.

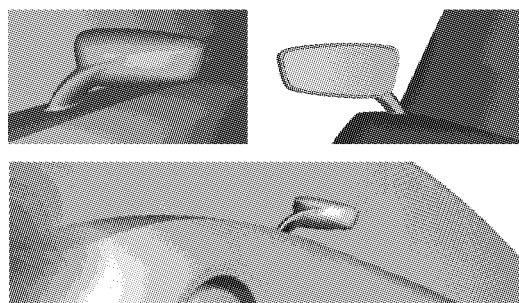


图 12 外后视镜

Fig.12 The mirror design

3.2.7 前轮扰流板

车轮前方来流冲入轮腔后, 在车轮的转动下会造成较强的紊流而增大阻力. 而车轮前方的小扰流板由于大大减少了进入轮腔的气流, 从而明显弱化了轮腔内的紊流, 最终降低了整车风阻^[6]. 本方案设置其尺寸为宽 200 mm(约与车轮等宽)、高 40 mm. 经 CFD 仿真, C_D 由 0.174 降至 0.157, ΔC_D 达 -0.017, 而对造型风格的影响却可以忽略, 如图 13 所示.

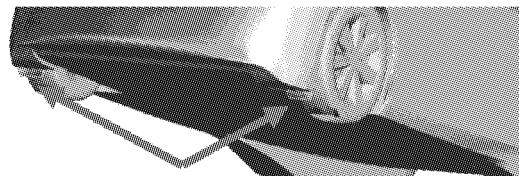


图 13 前轮扰流板

Fig.13 The front wheel spoiler

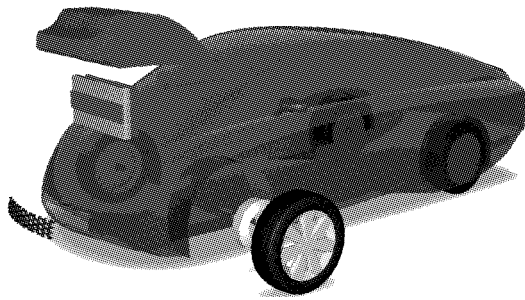
3.2.8 流道

电动汽车仍涉及热管理问题, 因此需考虑格栅造型及内流, 实现与热的耦合, 包括前格栅和内流道的气动设计和优化; 散热器、虚拟风机、轮毂电机等阻力特性分析、流道的优化设计; 热耦合对整车气动阻力影响分析等, 结构及分析结果如图 14 所示. 经 CFD 仿真, 得到 C_D 为 0.180 6.

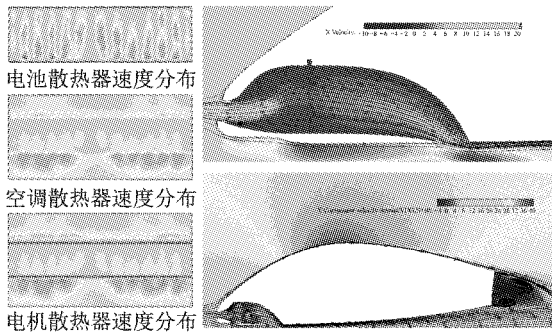
3.3 整车风洞试验

通过 CFD 仿真迭代, 确定了低阻车型的整体及主要局部, 在此基础上制作了 1:1 硬质模型, 包含了内流道及风机、散热器等部件, 并在同济大学 1:1 风洞中进行了气动试验, 得到 C_D 为 0.193.

图 15 为试验照片, 由图可见气流经过车顶至尾部时一直紧贴车体而未发生分离; 气流经过后视镜时也保持了良好的流线, 未产生大的涡流; 尾涡也很小. 以上均直观地表明了车型良好的气动低阻性能.



a 格栅、内流道、散热器、虚拟风机及局部构件



b 各部件的气动性能仿真结果

图 14 内流道及散热器、风机及风罩优化

Fig.14 Optimization of flow channel, radiator, fans and fan housing

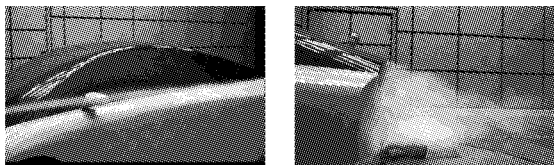
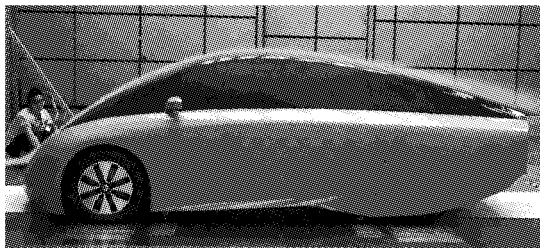


图 15 硬质整车模型风洞试验

Fig.15 Wind-tunnel test of the full-scale hard model

4 结论

通过造型和空气动力学的逐渐细化和迭代,得

到了全尺寸模型,风洞试验值 C_D 为 0.193,明显优于预估目标值 0.238. 特别是在具有后视镜和考虑内流的情况下,这是非常好的结果.

研究方法采用了低阻体、形态仿生、气动、散热、人机布局耦合的方法,并通过 CFD 和造型的反复迭代,将气动研究方法和造型设计相融合,形成了低阻研究与实践的有效结合.

风格鲜明,采用了仿生造型方法,比传统汽车有明显突破,流畅顺滑,直观地体现出了电动汽车的低阻化,辨识度高.

实用性较强,采用了偏置 3 座布局,既可以使得车顶后部高度明显降低,也可以使得后排横向更加内收,非常利于减阻,在满足实用的同时大大提高了空间利用率.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 贾青,李挺,杨志刚. 旋转车轮对整车气动性能的影响评价[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(6): 949.
JIA Qing, LI Ting, YANG Zhigang. Influence of Rotating Wheels on Vehicle Aerodynamics [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(6): 949.
- [3] 王玉珏. 新技术对电动汽车造型设计的影响[J]. 科教导刊, 2012(9): 213.
WANG Yujue. The impact of new technology to electric vehicle design [J]. The Guide of Science & Education, 2012(9): 213.
- [4] 徐飞. 分布式驱动电动汽车造型设计[D]. 上海: 同济大学, 2013.
XU Fei. The design study of distributed-driving electric car [D]. Shanghai: Tongji University, 2013.
- [5] 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, 44:1578.
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, 44:1578.
- [6] JIA Qing, RASHIDI M M, JU S B, et al. The influence of wheel spoiler height on vehicle drag reduction [J]. Fluid Mechanics, 2015, 1(2): 11.