

低风阻分体式电动汽车造型设计

李彦龙^{1,2}, 谭嘉伟¹, 李启良², 王 凡¹

(1. 同济大学 汽车学院, 上海 201804; 2. 同济大学 上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804)

摘要: 分体式造型是汽车外形设计的全新领域,在造型方面具有突破性的意义,但突出的问题之一是风阻往往比普通汽车更高,因此如何做到低阻化是一个新的课题.以 A 级车为参考车型级别,建立了分体式低风阻基本造型,并考虑了人机空间等基本实用性因素.之后通过造型不断细化与空气动力学仿真迭代方法,最终获得了风格鲜明的分体式造型,并使其风阻系数 C_D 仅为 0.224 9,达到了预期目标,具有应用与推广价值.

关键词: 汽车造型设计; 分体式车身; 低阻造型

中图分类号: U 461.2

文献标志码: A

Exterior Design Research on Split-body Car with Low-drag for Electric Cars

LI Yanlong^{1,2}, TAN Jiawei¹, LI Qiliang², WANG Fan¹

(1. College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Automobile Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Split-body styling, different from uni-body styling, has breakthrough meaning as for car exterior design, however the higher air drag will come up to be a new problem. Based on an A-segment car as reference, a low-drag basic form was built, which was considered with ergonomics so as to make it more practical. Started with the basic form, the design transformed into real car design while keeping the form low-drag through computational fluid dynamics (CFD). Eventually, it resulted in a unique split-body design with C_D , the coefficient of drag, being 0.224 9, which is quite practical and of high value for promotion.

Key words: car design; split-body; low-drag form

汽车造型与空气动力学关系密切,整体顺滑的“整体式”外形有利于降低风阻系数 C_D ,从而达到减

小风阻的目的.从 20 世纪 70 年代至今,主流的量产车型都采用了类似的整体式,在利于减小风阻的同时也导致了造型风格同质化.如果能突破整体式形态而转向分体式造型的同时也能满足低风阻,则对整个汽车造型行业突破同质化具有很大意义,从而使得造型风格更加多样化.

1 主流量产车型的基本形态构成概述

1.1 主流量产车型在形态构成上以整体式为主,长期处于同质化状态

以典型的奥迪中级轿车系列为例,1976 年的奥迪 100 是典型的三厢式造型(在空气动力学领域此类车体又称为“船型”),发动机舱、乘员舱、行李舱之间转折明显,因此风阻系数相对较大,如图 1 所示.



图 1 1976 年奥迪 100LS:典型的三厢式轿车
Fig.1 The 1976 Audi 100LS: a typical sedan

1982 年的奥迪 100 C3 采取了一系列减阻措施,成功将风阻系数降低至 0.30^[1]而引起业界轰动.从形态角度看,比较明显的变化是车身表面平滑化设计,但整体构型仍为典型的三厢式,如图 2 所示.

此后经多次换代,空气动力学也继续得以优化,至 2012 年的 A6,其风阻系数降至 0.26 左右,造型的特征延续了平滑化特点(特别是窗框与车身本

体),在造型特征如格栅、棱线等方面有明显创新,仍延续了流畅的三厢式构型,如图 3 所示.



图 2 1982 年奥迪 100 C3
Fig.2 The 1982 Audi 100 C3



图 3 2012 年奥迪 A6
Fig.3 The 2012 Audi A6

综合以上三代车型可以看出,尽管在造型上各代都有所创新,但同时也保持了共同的基本特征——三厢式.而此类车身侧面前后方向顺滑过渡呈现为一个整体,因此称作整体式造型.

实际上同时代的汽车基本上都是此类格局,不同品牌、不同车型在形态上都非常类似.汽车设计被认为近几十年来鲜有出新,而市场则抱怨汽车设计千篇一律,个性化、多样化不足.

导致此现象的重要原因之一是汽车在低阻化造型设计方面的一个比较稳定的思路:即采用整体优化(Shape Optimization)的方法,从单一低阻基本体出发,结合量产车的实用性要求逐步分化出机舱、客舱、行李舱等特征,使得最终车型的风阻系数 C_D 达到较为理想的数值,如图 4 所示^[1].

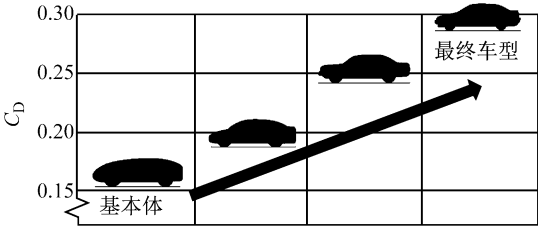


图 4 整体最佳化流程
Fig.4 The process of shape optimization

1.2 分体式形态构成可以大幅度改观汽车造型同质化现象,但对于传统车而言也存在一定障碍

所谓分体式造型,从形态构成角度来看,重要的特征之一是车轮部位与车身本体的关系不再是顺滑过渡,而是相对分离,如图 5 所示.同为奥迪品牌,这种造型独特性和识别性都很高,可见采用分体式构成能够大幅度改观现有造型同质化现象.



图 5 典型的分体式车身造型:奥迪 Urban 概念车
Fig.5 A typical split-body styling: Audi Urban Concept

分体式造型之所以未能普及,其原因是多方面的:一是传统车的动力及传动主要依靠机械方式,因此在布局上不够自由;二是由于车轮部位的独立使得车体不再是流线体,而是多个独立形态形成的复杂组合体,即车身本体+四个车轮+连接件.这样就明显破坏了流线型形体,使风阻大幅度上升,从而使实用性大大下降.

图 6 所示为世界上最早的汽车之一^[2],其整车基本形态构成为车身+车轮.子弹状的车身明显有减小风阻的意图,然而由于车轮(没有轮罩)和驾驶员暴露在车身之外,流线型体实际上已被打破,整体风阻还是很高.



图 6 1899 年的 La Jamais Contente
Fig.6 The 1899 La Jamais Contente

1928 年的梅赛德斯-奔驰 720 SSK,其车轮也明显与车体分离,如图 7 所示,而其风阻系数高达 0.91^[1].



图 7 1928 年的 梅赛德斯-奔驰 720 SSK
Fig.7 The 1928 Mercedes-Benz 720 SSK

现代汽车中典型的例子是 F1 赛车(属非量产车),其风阻系数高达 1.0 左右.

在节能环保问题日益突出的情况下,对于量产车型,风阻高带来的负面问题,尤其是能耗问题更为重要.

1.3 电动汽车在低阻化分体式造型方面潜力巨大

随着能源、环保问题的日益突出,电动汽车发展迅速.电动汽车由于在动力、传动方面省去了很多机械杆件,在布局上有很大的自由度,从而在造型上也有巨大的空间突破传统.同时,基于节能环保的要求,低风阻也电动车必备的特质之一,而车身造型约束因素的减少也使得低阻化设计潜力更大,从而大幅度降低风阻系数成为可能^[3].

2 低阻化技术路线规划

要获得低阻造型,从空气动力学优化角度有两种技术路线:

技术路线 A:先设计一定形状的分体造型,然后建立三维数模并用 CFD 进行空气动力学优化,多次反复直至最后完成设计.其特点是初始风阻较高,而通过后期优化逐渐降低,最终达到相对较低的风阻系数.此方法相当于空气动力学研究中的“细节最佳化”.

技术路线 B:从理想基本体出发,确保其初始形态已经是低阻.同时经过人机布置方面的考虑,并在此基础之上进行形面、体量、连接方式以及功能等方面的设计.其特点是初始风阻系数很低,而后随着设计细化,风阻系数有可能逐渐升高,最后达到理想数值.此方法相当于空气动力学研究中的“整体最佳化”.

根据空气动力学研究经验,技术路线 B 相比技术路线 A 而言,更容易在各阶段获得较低的风阻.因此此处采用技术路线 B,而且在最早开始的阶段作

出的不是单一理想低阻体,而是复合理想低阻体,即由一个主体(车体)、四个附体(轮罩)共五个理想低阻体组合而成的形态,如图 8 所示.

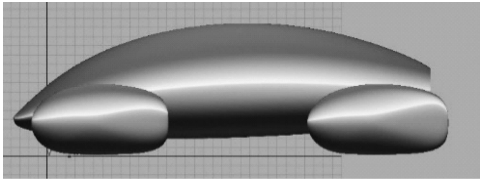


图 8 由理想低阻体组成的基本形态
Fig.8 Basic form composed of ideal low-drag shapes

3 低风阻分体式汽车造型设计研究

3.1 车型尺寸定位及人机布置

考虑车型的实用性,结合市场上主流的三厢、两厢车型,本文研究对象为 A 级车尺寸,乘客数量设定为 4 名^[4],如图 9 所示.

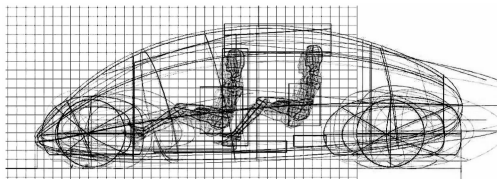
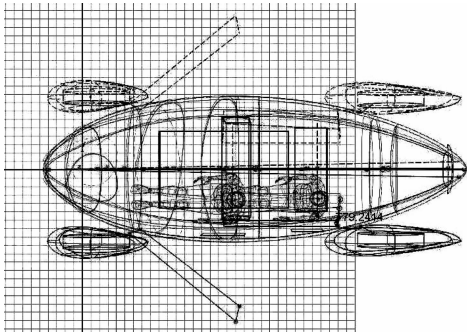


图 9 基本布置图
Fig.9 Basic package

为了兼顾实用性,要对车内空间、安全性、舒适性、操作方便性和视野等做系统考虑.因此,需在做造型设计之前以基本体为基础进行基本布置,包括电池、电机等的空间考虑和驾乘人员活动范围与上下车便利性以及开门方式等的考虑^[5].

分布式驱动电动车解放了燃油汽车的发动机舱空间,这样前悬及机罩高度大大减小,使得半水滴形的 Y0 轮廓变得可能且合理,而采用轮边或轮毂电机则更容易体现出分体式造型设计的特点.

3.2 造型设计

该方案的关键词为“张力”.此处张力不但指自

身张力,也指形态的视觉张力.自身张力是力求一种受空气挤压所形成的最佳形态,犹如下落的水滴受到重力以及空气阻力自然形成的形态.而形面张力则是求一种如薄膜被撑开的形态.如图 10 所示,分为如下三个阶段:

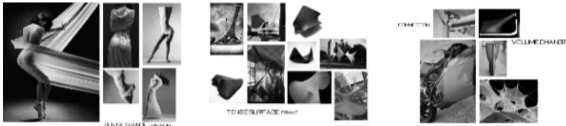


图 10 方案意向图
Fig.10 Image board

(1) 草图创意实际上是从体量的角度入手,尽可能多地创造出不同的体量关系.比如前轮与车体分离、后轮与车体分离、前后轮均与车体分离等种种情况,如图 11 所示.

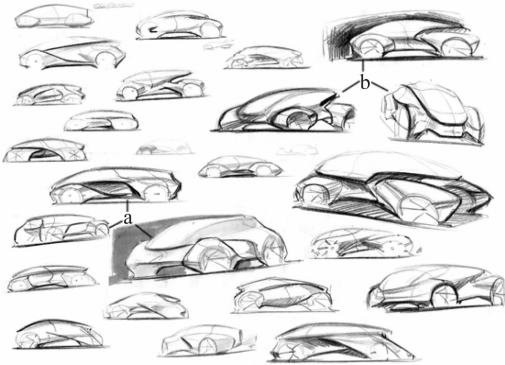


图 11 第一阶段草图
Fig.11 First-round sketches

(2) 草图更多地推敲、分析了体量与形面语言,在车的 Y0 后半段加上类似船桨“插”在水滴形的车身上的形态:一方面从造型上可以打破水滴形的俗套,另一方面尖细的尾部正投影面积仍很小,利于减小气流分离,如图 12 所示.

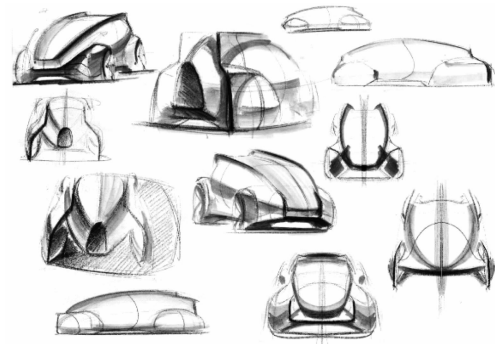


图 12 第二阶段草图
Fig.12 Second-round sketches

(3) 通过材质的分割,将座舱、轮包等大体量、

大整面破开,不但丰富了造型,而且合适的比例分割会使整体的视觉感受更为丰富,并体现了未来感、科技感.同时也对车顶后半段做了平顶与凹凸顶之间的形态推敲,从而实现拓展内部空间以及优化气动性能的两种模式之间的切换,如图 13 所示.

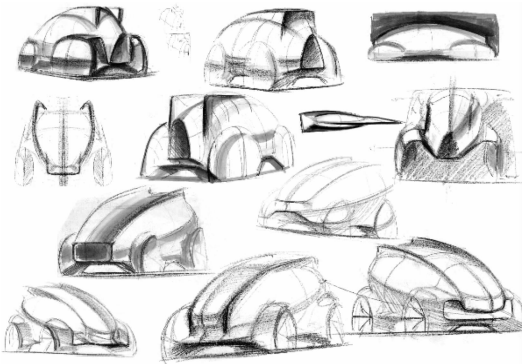


图 13 第三阶段草图
Fig.13 Fifth-round sketches

经过多轮设计,形成了风格较为明确的方案效果,如图 14 所示,造型亮点如下:

- (1) 分体式的造型独特,极具外观辨识度,且很适于分布式驱动电动汽车.
- (2) 各部分均为低阻的梭形元素,有利于组合后的低阻化,又形成了新的姿态,动感而不失稳健.
- (3) 平顶设计带来的 Y0 的全新视觉效果,且有利于头部空间;
- (4) 在各分体形态上采用适当的色块分割,使得造型效果更为丰富.

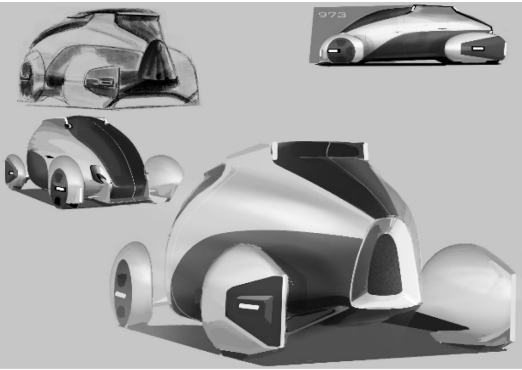


图 14 效果图
Fig.14 Rendering

3.3 空气动力学仿真及优化

3.3.1 第一轮优化

如图 15 所示,右侧模型相比左侧加大了座舱空间,和整车的高度,缩短并前移了前轮包,增加了轴距.以上变化使得组合体的总 C_D 从 0.088 9 急剧上升到 0.309 3.

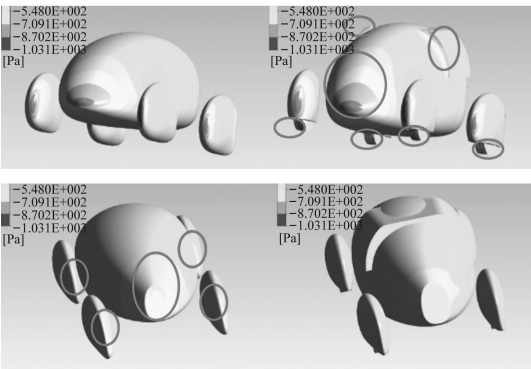


图 15 车身表面压力云图后侧视角

Fig.15 Body pressure nephogram of rear view

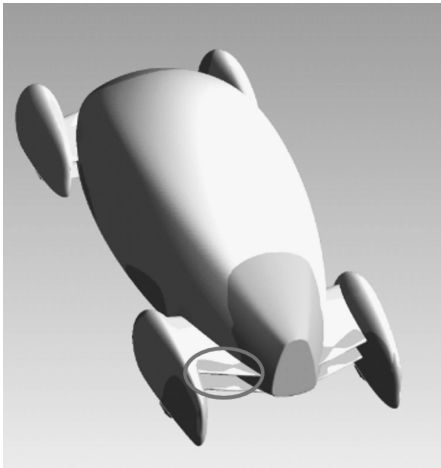


图 17 车轮与车身之间的翼型连接件

Fig.17 Airfoil connection between body and wheels

3.3.2 第二轮优化

经过优化, C_D 有明显下降,为 0.22. 考虑到后期还要添加车身连接以及顶部副形体,因此在该阶段需要进行造型优化及采取减阻措施.

由图 16 可知有两处需要继续优化:一是从 Y_0 线可知,整车的高点较为靠后,使得逆压梯度过大,不利于减阻;二是后轮包位置存在局部低压区,此现象可能源于两者间隙过小以及间隙形状.

根据此结果,决定后续的翼型角度对照试验均采用上下对称翼型.

3.3.4 第四轮优化

本轮增加了平顶,一方面是为了增加乘客的头部空间,另一方面是在造型上更为丰富. 顶部造型的增加使得 C_D 达到了 0.221 6.

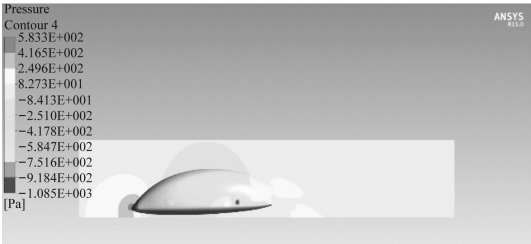


图 16 纵截面的压力云图

Fig.16 Pressure nephogram in longitudinal section

表 2 不同翼型角度模型风阻系数对比

Tab.2 C_D comparison of different airfoil angle	
后轮处连接翼型倾角	C_D
a 翼面向外放射形排列	0.224 9
b 翼面向外收缩形排列	0.226 2

从纵截面上的速度云图(图 18)可以看出,在乘员舱后部存在明显的分离,若要改善该区域的流场,可尝试调整乘员舱的高度及局部的倾角.

3.3.3 第三轮优化

针对上轮仿真结果,将整车高点前移,减小了逆压梯度,并将后轮包外移. 同时,从结构角度考虑,将车身与轮包间用双翼型连接,翼型内可容纳悬架杆件,如图 17 所示.

连接件的截面选择了对称及不对称两组进行对照仿真,结果见表 1.

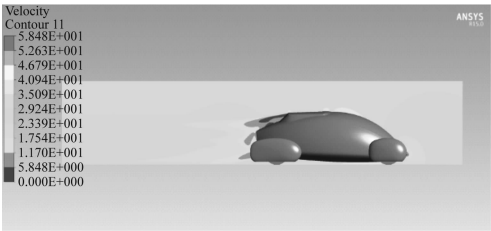


图 18 纵截面上的速度云图

Fig.18 Velocity nephogram in longitudinal section

表 1 对称及不对称翼型模型 C_D

Tab.1 C_D of symmetric and asymmetric airfoil	
翼型截面	C_D
上下对称	0.202
上下不对称	0.208

3.3.5 第五轮优化

为了探讨连接件的不同效果,对连接件进行了两种排列:向外放射形排列;向外收缩形排列.

从压云图(图 19)可以看出 19a 的压力要高于 19b,即在几乎相同的迎风面积下,19a 模型的风阻系数要小于 19b 模型.

比较可知,翼面向外放射形排列空气动力学性能更优,其视觉效果也开张,据此确定最终造型.

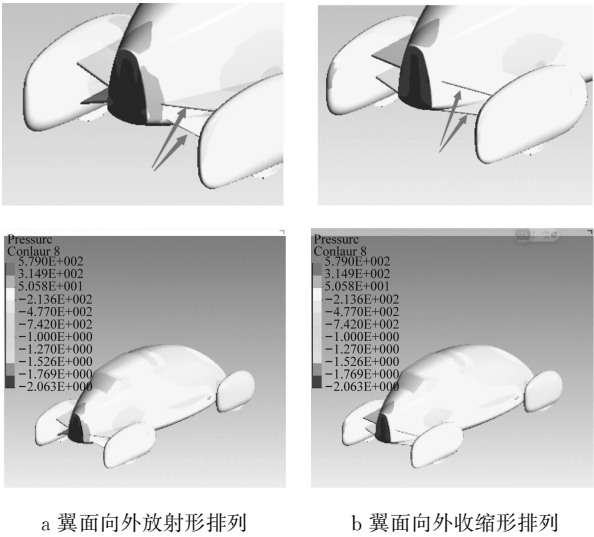


图 19 不同翼面排列时表面压力云图

Fig.19 Pressure nephogram with different wing arrangements

4 最终设计方案

4.1 数字模型效果图

该造型保持了分体式的体量关系,尤其从俯视图可看出轮包与车身明显分开;整车高点靠前,车顶则突破了整车水滴形的姿态,使造型更为丰富;极小的前后悬呈现出“四轮四角”的比例,反映出整车较高的空间利用率;车身与轮包间的翼型连接体现出基本的功能性,同时也力求低阻;色彩分割使得简单的形面也具有足够丰富的美感;车灯采用矩阵 LED,体现出节能环保的特点,详见图 20 所示。

4.2 1/4 比例模型

1/4 比例模型基本还原了三维数字效果,见图 21,在造型的细节、涂装等方面稍稍作了调整,如车后风窗位置的黑色涂装也连成整体,也增加了整体感。

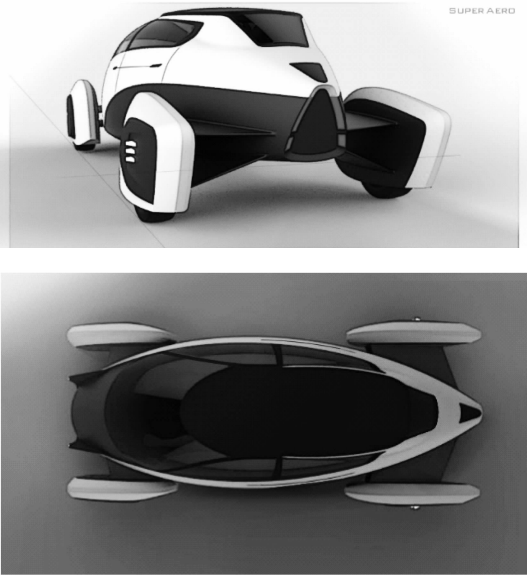


图 20 三维数字效果图

Fig.20 Three-dimension digital rendering

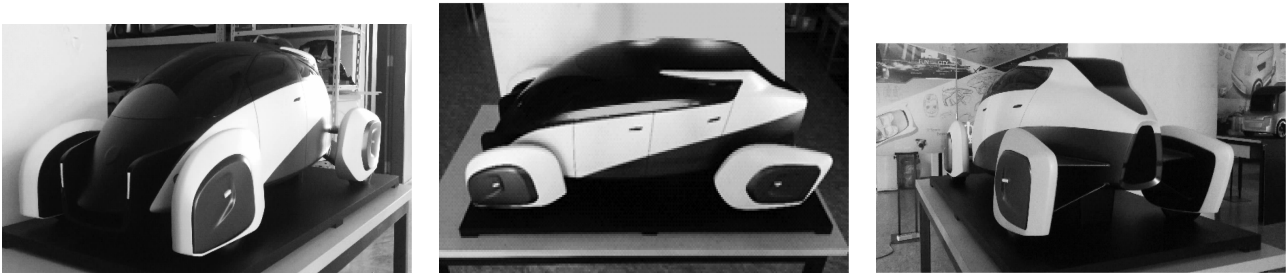


图 21 方案 1/4 模型照片

Fig.21 Photos of 1/4 scale model

5 结论

从理想基本体的组合出发,兼顾人机布置、空气动力学优化等,得到了分体式低阻造型.

以若干流线型形态分别作为车身本体、轮罩,并以翼面将其组合连接,打破了传统汽车的整体流线格局,获得了鲜明的分体式造型风格.

根据造型的逐渐细化和迭代,最终得到了 $C_D=0.224\ 9$,作为分体式造型这是一个理想的结果. 根据经验,即使考虑到底盘结构、分缝线、后视镜等因素,最终的 C_D 也将会在 $0.25\sim0.26$ 之间,仍低于绝大多数现有量产车型.

造型兼顾了基本的实用性,包括人机布置为 4 人,可满足绝大多数实际应用;电池等动力系统的布置位于车体底层,利于降低重心,并获得平整底部;车轮与车体连接的布置可供安装悬架杆件.

分体式造型意义巨大. 对于分布式电动汽车而言,分体式造型可以大幅度改观整体式造型格局. 对于传统汽车,如果驱动及悬架机构加以调整,此类造型也有很大的适用空间. 如此,给未来的汽车造型增加很多新的机遇,乃至更大范围、更加深刻地引发汽车造型的变革.

参考文献:

[1] HUCHO W H. Aerodynamics of road vehicles [M]. [S. l.]. SAE,1998.

[2] 马芳武. 汽车空气动力学[M]. 北京:机械工业出版社,1993. MA Fangwu. Automotive aerodynamics [M]. Beijing: China Machine Press, 1993.

[3] 韦甘, 杨志刚, 李启良. 低阻车身形体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.

[4] 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.

[5] 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 for car body under constraints of inner space [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42 (12): 1886.

[6] 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.