

基于偏好与形状文法的电动汽车形态设计研究

张家祺, 王国华, 张艳
(河北工业大学, 天津 300131)

摘要: **目的** 结合消费者偏好和对品牌识别的需求, 分析电动汽车外形设计特征, 提高用户满意度。**方法** 分析电动汽车的设计特征, 引入原型范畴理论研究消费者偏好。将形状文法参数化, 针对设计特征曲线的变化, 基于原型偏好模型和品牌识别的要求制定修改性规则约束。提出偏好因子和品牌因子的概念, 调节修改性规则的坐标点变化空间, 利用交互式遗传算法构建计算机辅助设计系统。最后, 利用计算流体动力学 (CFD) 分析方法, 对车身形态的外部流场和表面压强进行分析, 检验并优化车身造型, 对设计结果进行满意度评价。**结果** 提出基于偏好与形状文法的电动汽车形态设计方法, 通过对青年消费者的偏好调查分析, 建立原型偏好模型。通过计算机辅助设计系统对原型偏好模型中的特征水平进行分析, 求得分析结果的坐标值并对相关特征水平进行线性表达, 建立理想低风阻体模型并进行具体样式优化。**结论** 以奥迪品牌的电动汽车设计为例, 根据分析建立的理想低风阻体模型的模拟仿真分析结果较理想, 对设计效果进行用户满意度对比评价, 电动汽车外形设计的满意度有所提高, 验证了该方法的可行性。

关键词: 消费者偏好; 品牌识别; 参数化形状文法; 外部流场分析

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)20-0102-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.20.011

Electric Vehicle Form Design Based on Preference and Shape Grammar

ZHANG Jia-qi, WANG Guo-hua, ZHANG Yan
(Hebei University of Technology, Tianjin 300131, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze the appearance design features of electric vehicles, combining consumer preferences and the need for brand recognition, and improve user satisfaction. The design features of electric vehicle are analyzed, introducing the prototype category theory to study consumer preferences. The shape grammar is parametrized to develop modifiable rule constraints based on the prototype preference model and the requirements of brand recognition for changes in design feature curve. Then the concepts, preference factor and brand factor, are proposed to adjust the coordinate point change space of the modification rule, using interactive genetic algorithms to establish a computer aided design system. Finally, the computational fluid dynamics (CFD) analysis method is used to analyze the external flow field and surface pressure of the car shape and then the body shape is inspected and optimized, finally the design results are compared and evaluated. The electric vehicle shape design method based on preference and shape grammar is proposed. And the prototype preference model is established through the preference survey analysis of young consumers. Combined with the computer-aided design system, the feature level in the prototype preference model is analyzed, the coordinate value of the analysis result is obtained and the relevant feature level is linearly expressed, the ideal low wind resistance body model is established and the specific style is optimized. Taking the Audi brand electric vehicle design as an example, the simulation analysis results of the ideal low wind resistance body model established according to the analysis are more satisfactory, and the user satisfaction degree of the design effect was compared and evaluated, which verified the feasibility of the method. This method can effectively improve users' satisfaction with the appearance design of electric vehicles.

收稿日期: 2022-05-13

作者简介: 张家祺 (1963—), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向为工业设计。

通信作者: 王国华 (1996—), 男, 硕士生, 主攻工业设计。

KEY WORDS: consumer preference; brand identity; parametric shape grammar; external flow field analysis

近年来,许多新兴电动汽车品牌不断涌现,传统汽车品牌也纷纷开始设计并推出电动汽车。在汽车设计中,设计者常利用造型创新和品牌知名度来提升产品的市场表现^[1],让新产品得到消费者认可。因此电动汽车外型创新和品牌发展的研究越来越受重视。在造型创新的研究中,李勇等^[2]通过对比传统燃油车和概念电动车的造型分析了当前电动汽车的发展瓶颈和趋势,邓亚林等^[3]对不同平台的电动汽车特征线进行对比,分析了未来电动汽车的设计特点,李勇等^[4]从设计的比例和曲面风格等角度对电动汽车进行设计分析,但就目前电动汽车造型和风格而言,多数车型仍沿用传统燃油车的外观造型。在品牌发展的研究中,为保持已有品牌的继承性,赵静等^[5]对有关电动汽车品牌的设计特征进行了研究,张文泉等^[6]研究了品牌发展与汽车造型特征间的关系,赵丹华等^[7]研究了汽车品牌与造型风格的语义表达,以指导设计。随着消费观念进入感性消费时代,以下几方面的问题仍需继续研究:(1)电动汽车的创新设计应能迎合消费者的需求;(2)电动汽车在自身的设计中能够塑造品牌全新的视觉形象和可识别性;(3)电动汽车的续航能力受自身气动阻力的影响较大,需要符合良好的气动性能要求。基于以上分析,本文提出了一种基于偏好与形状文法的电动汽车形态设计方法。引入原型范畴理论研究消费者偏好,从偏好的角度探究电动汽车外形的创新设计,结合参数化形状文法研究偏好和品牌识别的设计要求,利用计算流体力学(CFD)分析方法进行模拟仿真分析。

1 原型偏好模型

1.1 原型范畴理论与消费者偏好

原型范畴理论起源于家族相似性理论。1973 年 Rosch 提出了原型概念^[8],认为范畴化的方式是原型概念,而原型概念在范畴中最具代表性和典型性,可以作为其他成员在范畴中的认知参照点^[9],并提出了原型范畴理论。原型范畴理论认为范畴是根据成员间的典型特征建立的,具有模糊边界,且同一范畴的成员中有中心成员和边缘成员的区分。认知参照点就属于范畴中的中心成员,具有范畴中的典型特征。基于原型范畴理论,李然等^[10]针对类型成员的划分建立了不同车型的分类方法,范馨月^[11]研究了中英概念隐喻对比并取得了较好的研究成果。认知心理学研究认为,与感官感觉相比,偏好是更高层次的认知^[12],反映出人的喜好和兴趣,因此将原型范畴理论引入对消费者偏好的研究,建立关于偏好的原型范畴,确定中心成员作为偏好研究的认知参照点。关于偏好的原型范畴的特点如图 1 所示。

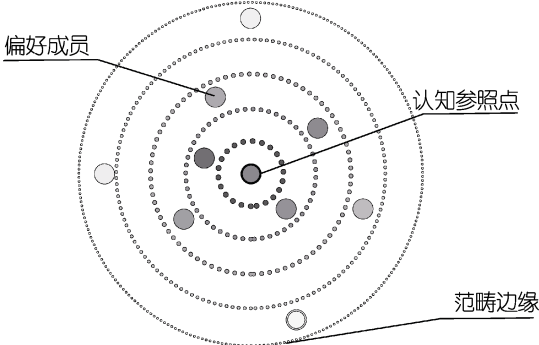


图 1 关于偏好的原型范畴
Fig.1 On the archetype category of preference

在注重以人为本的今天,从原型范畴的角度研究消费者偏好,为提高用户满意度提供了新的思路。

1.2 原型偏好模型的构建

选择电动汽车样本对消费者偏好进行调查,将汽车的整体设计分解为几种不同的设计特征并进行组合排列。采用联合分析方法^[13]分析消费者偏好,将偏好数据量化为设计特征和特征水平的衡量标准^[14],如表 1 所示。

表 1 设计特征和特征水平
Tab.1 Design features and features levels

设计特征	特征水平	贡献率 u	权重 $q/\%$
A	A_1	u_1^A	q^A
	A_2	u_2^A	
B	B_1	u_1^B	q^B
	B_2	u_2^B	
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
M	M_1	u_1^M	q^M
	M_2	u_2^M	
	$\vdots$	$\vdots$	
	M_k	u_k^M	

将贡献率最高的特征水平确定为关于偏好的原型范畴中的认知参照点。范畴中贡献率高的成员越接近认知参照点,而较低者则远离认知参照点^[15],越远离范畴中心对提升用户满意度的效果也就越小。结合设计特征的权重和特征水平的贡献率建立原型偏好模型。结合表 1,原型偏好模型的表达式如下:

$$A=b+\beta(u_k^Aq^A+u_k^Bq^B+\cdots u_k^Mq^M),k\in(1,2,3,4) \quad (1)$$

式中, b 和 β 为常数,共划 M 分个设计特征, u_k^M 为第 M 个设计特征下第 k 个特征水平的贡献率, q^M 为第 M 个设计特征的权重。

2 参数化形状文法

形状文法最初由 George Stiny 和 James Gips 提出,被应用于建筑设计领域后逐渐扩展到品牌识别和工业设计领域^[16]。形状文法的规则分为生成性规则和修改性规则,生成性规则用于确定初始形状,修改性规则是在初始造型上进行调节变换。形状文法的规则根据具体的设计要求进行提取与制定,规则应用灵活,因此它的适用范围才逐渐得到扩展。

参数化形状文法^[17]是指对形状文法的规则变化进行参数化表达,通过算法应用规则实现自动生成和变化。Jowers 等^[18]建立了特定算法应用于形状文法规则的自动进化; Lee 等^[19]利用算法框架应用于形状文法生成性规则的自动进化,但同时也提出,形状文法规则在自动进化过程中设计师无法进行规则的有效制定和控制^[20],规则应用不够灵活。因此,本文利用贝塞尔曲线方法描绘设计特征线并标记曲线的硬点和控制点,约束硬点间的位置关系,作为形状文法修改性规则约束;设置因子阈值控制坐标点的变化空间,提高形状文法修改性规则的应用灵活性,结合交互式遗传算法建立规则的自动进化系统。

2.1 修改性规则约束

分别以原型偏好模型和品牌识别的要求作为形状文法修改性规则的约束条件。具体方式为:通过对有限个贝塞尔曲线坐标点位置关系的约束,完成对某种具体的特征水平造型和品牌识别造型的形状约束。例如,某品牌的设计要求为具有较扁平的六边形格栅造型特征,如图 2 所示。

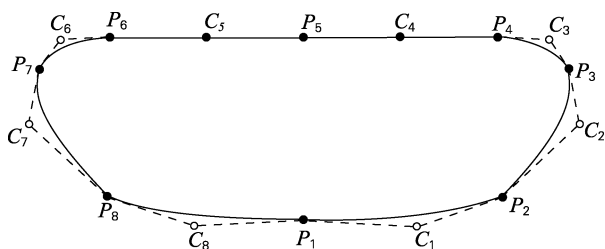


图 2 坐标点约束
Fig.2 Coordinate point constraints

对坐标点做如下规则约束:

$$P_3(x) > P_4(x); P_7(x) < P_6(x); P_8(x) < P_1(x); P_2(x) > P_1(x); P_6(y) > P_7(y); P_4(y) > P_3(y); P_1(y) < P_8(y); P_2(y) > P_1(y).$$

在基于原型偏好模型的修改性规则约束中,如将原型偏好模型中某一个特征水平 E_2 作为修改性规则约束, E_2 对应的特征水平为不规则前灯造型,如图 3 所示。

对修改性规则做如下坐标点约束:

$$P_1(x) > P_7(x); P_7(x) > P_6(x); P_2(x) > P_1(x); P_4(x) > P_5(x); P_7(y) > P_1(y); P_6(y) > P_7(y); P_5(y) > P_4(y).$$

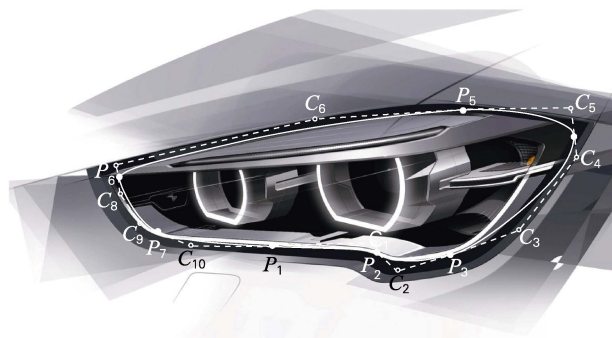


图 3 车灯坐标点约束
Fig.3 Coordinate point constraints of car light

以修改性规则约束确保形状文法的自动进化过程中变化结果能够符合模型中偏好特点和品牌识别的要求,提高设计满意度。

2.2 偏好因子和品牌因子

基于原型偏好模型设置偏好因子,利用偏好因子的阈值调节以原型偏好模型为修改性规则约束的特征曲线上坐标点的变化空间^[21],坐标点变化空间如图 4 所示。

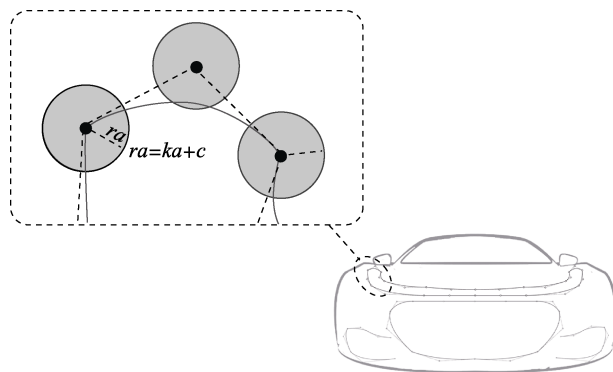


图 4 坐标点变化空间
Fig.4 Coordinate point change space

变化空间是指坐标点以自身为原点,以偏好因子阈值为半径构建的圆形可变空间,偏好因子为 k_a ,其中 r_a 为偏好因子调节的坐标点变化空间半径, c 为常数。表达式如下:

$$r_a = k_a + c \quad (2)$$

已经证明形状文法在品牌特征的继承和识别设计方面具有良好的效果^[22],因此通过设置品牌因子,调节以品牌识别为目标的修改性规则约束的坐标点变化空间,确保汽车的品牌文化在新车型上的继承和传播,保持品牌影响力。品牌因子为 k_b ,表达式如下:

$$r_b = k_b + d \quad (3)$$

式中, r_b 为品牌因子调节的坐标点变化空间半径, d 为常数。

在品牌因子阈值的设置中,较大的阈值会使形状文法自动进化失去品牌原有的特征,不利于品牌影响力的延续和发展,适当的阈值大小可保证品牌识别特征在下一代设计中继续保持。而偏好因子是指调节除

品牌识别特征外其他特征造型的变化空间, 较大的阈值有利于形态的设计创新, 但具有更大的设计自由的同时基于原型偏好模型的修改性规则约束也随之降低。适当的阈值设置能在有限的进化代数内完成符合约束的进化, 让受到消费者偏好的设计特点仍能够继续保持。因此, 需要通过两种因子的阈值设置权衡创新设计和品牌识别两方面要求。

3 基于偏好与形状文法的电动汽车设计流程

汽车的设计可以被定义为从一系列的描绘逐渐走向现实的过程, 细节最佳化的流程^[23]多用于燃油车型的迭代设计。空气动力学研究表明, 整体最佳化的设计^[24]容易获得更好的风阻表现。因此, 利用原型范畴理论和消费者偏好, 构建原型偏好模型并将形状文法进行参数化应用, 通过修改性规则约束和因子的阈值设置权衡设计创新和品牌识别的设计要求, 用于电动汽车外形特征的设计^[25], 建立从理想低风阻体到具体样式优化的整体最佳化设计流程。具体研究框架如图 5 所示。

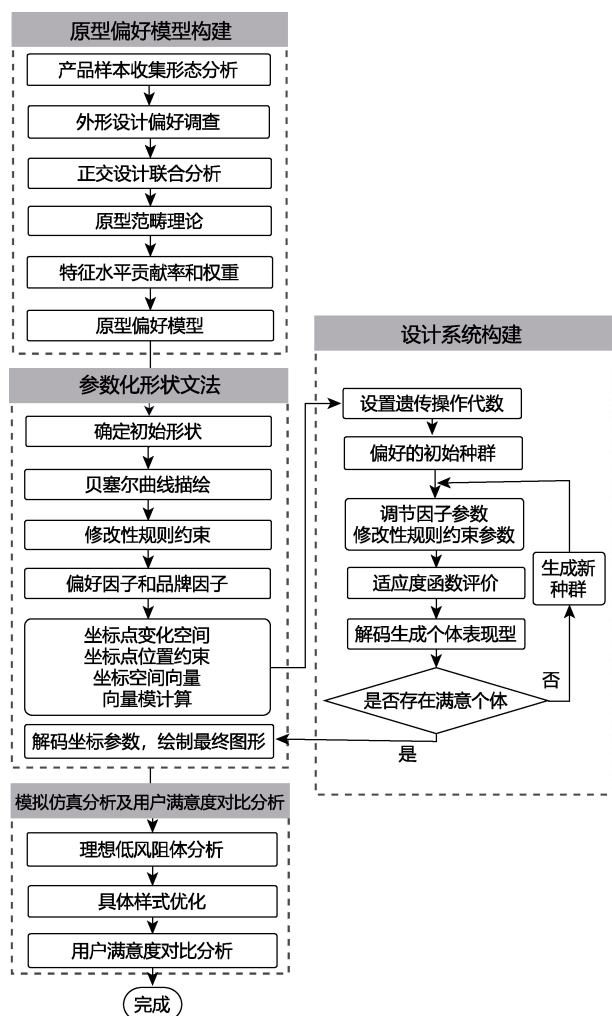


图 5 研究框架

Fig.5 The frame of research

3.1 原型偏好模型构建

收集电动汽车样本, 对电动汽车形态分析从正面和侧面拆分设计特征, 如图 6 所示。

对消费者进行偏好调查。将偏好调查数据结合设计特征的正交设计在 spss 中进行联合分析, 分析设计特征的权重和特征水平的贡献率, 根据式 (1) 建立认知参照点的原型偏好模型表达式。

3.2 参数化形状文法

选择权重值高的设计特征, 根据调查样本中的研究对象, 利用贝塞尔曲线工具对高贡献率特征水平对应的造型进行设计特征线的描绘。对于 n 个给定点 P_i , N 阶贝塞尔曲线的表达式如下:

$$B(t) = \sum_{i=0}^n P_i (1-t)^{n-i} t^i = \binom{n}{0} P_0 (1-t)^n t^0 + \binom{n}{1} P_1 (1-t)^{n-1} t^1 + \dots + \binom{n}{n-1} P_{n-1} (1-t)^1 t^{n-1} + \binom{n}{n} P_n (1-t)^0 t^n, t \in [0, 1] \quad (4)$$

根据原型偏好模型中的特征水平制定相应的修改性规则约束, 同时结合实际设计中的品牌特征要求, 建立对品牌特征设计的修改性规则约束。以偏好因子和品牌因子的阈值设置调节修改性规则的坐标点变化空间, 结合交互式遗传算法建立辅助设计系统。

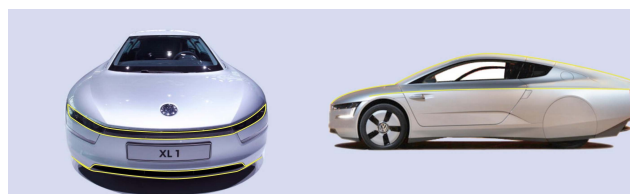


图 6 正面及侧面特征
Fig.6 Front and side features

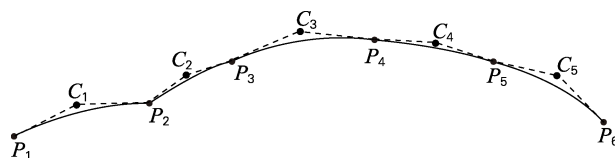


图 7 贝塞尔曲线的坐标点
Fig.7 Coordinate points of Bezier curve

相关研究表明, 前脸设计特征中格栅造型对汽车品牌识别的影响较为重要^[26]。因此, 针对格栅造型的变化, 基于品牌识别的要求设置修改性规则约束, 其他设计特征则基于原型偏好模型设置修改性规则约束。

3.3 设计系统构建

电动汽车的造型分解为前脸和正侧两方面共 M

个设计特征, 每一个特征采用 h 位二进制数进行编码, 设计特征的多联级编码形式如下^[27]:

$$\underbrace{b_{11}b_{12}\cdots b_{1h}}_{A_1} \underbrace{b_{21}b_{22}\cdots b_{2h}}_{A_2} \cdots \underbrace{b_{M1}b_{M2}\cdots b_{Mh}}_{A_M} \quad (5)$$

交互式遗传算法适应度函数由自动评价和人工评价结合而成。在自动评价阶段, 根据因子对坐标点变化空间的调节机制, 其适应度函数设计方式如下: 在 r_n 为半径的坐标点变化空间内, 以起始坐标点 A_{nx} 和变化后坐标点 B_{nx} 建立平面向量 $\overrightarrow{A_{nx}B_{nx}}$, 平面向量 $\overrightarrow{A_{nx}B_{nx}}$ 的模 $|\overrightarrow{A_{nx}B_{nx}}|$ 越大, 说明坐标点在变化空间内越靠近范围边界, 即在受到约束的有限变化空间内, 坐标点的变化最活跃, 变化效果最为理想, 如图 8 所示。

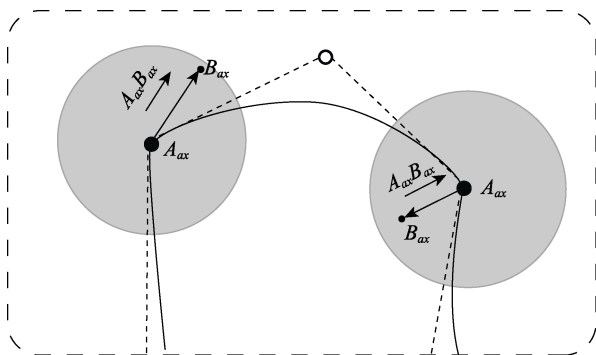


图 8 坐标向量构建
Fig.8 Coordinate point vector

当 $n=a$, 设计特征的部分适应值函数表达式如下:

$$N_a^M = \sum |\overrightarrow{A_{ax}B_{ax}}| \quad (6)$$

当 $n=b$, 设计特征的部分适应值函数表达式如下:

$$N_b = \sum |\overrightarrow{A_{bx}B_{bx}}| \quad (7)$$

式中, $|\overrightarrow{A_{ax}B_{ax}}|$ 为受偏好因子阈值约束的第 x 个坐标点变化后向量的模, N_a^M 为第 M 个设计特征的部分适应值函数; $|\overrightarrow{A_{bx}B_{bx}}|$ 为受品牌因子阈值约束的第 x 个坐标点变化后向量的模。 N_b 为品牌识别设计特征的部分适应值函数。全部形态的适应值函数表达式如下:

$$Fitn = \sum N_a^M + N_b \quad (8)$$

算法过程如图 2 所示。结束进化后输出满意解的坐标点坐标并描绘出对应的造型特征。

3.4 模拟仿真分析及用户满意度对比分析

根据运算结果获得的曲线硬点坐标进行特征线描绘并以侧面特征线为基础构建理想低风阻体模型, 利用 CFD (Computation Fluid Dynamics) 分析方法进行模拟仿真。

以侧面特征线为基础, 忽略后视镜、门把手、车灯等车身附件, 完成理想低风阻体的几何简化建模。

使用 ANSYS 有限元分析软件分析模型, 通过后处理程序观察流场中的现象, 完成有关性能的预测。在仿真分析中, 利用有限计算域模拟无限计算域。有限计算域一般为远大于模型尺寸的固定计算域, 设置空气从远处以恒定速度流入形成定常流, 模拟车身行驶时的正风情况^[28]。完成网格化、流场条件设置和迭代计算达到收敛条件后, 对模型的表面压力和速度矢量进行分析, 依据分析结果对理想低风阻体进行局部细节的优化。

在理想低风阻体的基础上结合进化结果对前脸造型进行具体样式优化, 完成正面和侧面设计效果的具体表现后, 对最终设计效果从外观偏好和前脸设计特征的识别性两方面进行用户满意度评价, 结合已有的品牌车型进行用户满意度的对比分析, 验证设计效果。

4 设计实例

4.1 原型偏好模型分析

搜集多家主流电动汽车品牌的电动汽车样本共 136 个, 选择设计研究人员进行样本分层分组实验, 将外形特征差异不明显的归为同类, 最终选择 28 个差异化样本用作后续研究。部分样本如图 9 所示。

对 28 个差异化样本从前脸和侧面分别进行设计特征拆分, 通过设计研究人员的 3 轮层次分析实验, 最终将外形设计特征拆分成前灯、格栅、下前围、立体度、车头比例、腰线、车顶线共 7 个方面的设计特征, 如图 10 所示。

针对 30 岁以下的青年消费者发放问卷调查, 经筛选共得到有效问卷 106 份, 将调查数据结合样本的正交设计在 SPSS 中进行分析, 分析的具体结果如表 2 所示。

分析结果表明, 前灯和格栅的设计特征权重较高, 是体现前脸形态造型的关键部件, 针对车前灯和格栅的形态设计, 需进一步结合电动汽车区别于传统燃油车的属性进行优化设计。侧面特征方面, 车头造型比例和车顶线权重值较高, 车头比例和车顶线能体现出侧面造型比例和车身走势, 因此对体现整体车身形态更重要。根据式 (1), β 取 1, 认知参照点对应的原型偏好模型表达式如下:

$$A = 4.668 + \left(\begin{aligned} &A_1 0.216 * 21.441\% + B_1 0.257 * 12.270\% + \\ &D_2 0.032 * 7.471\% + E_2 0.006 * 7.118\% + \\ &F_1 0.228 * 18.967\% + H_1 0.055 * 13.596\% + \\ &I_2 0.235 * 16.136\% \end{aligned} \right) \quad (9)$$

4.2 形状文法参数化应用

使用矢量绘图软件 AI (Illustrator) 对 28 个样本正面和侧面的设计特征线进行初步描绘, 如表 3 所示。



图 9 部分样本图片
Fig.9 Some sample pictures

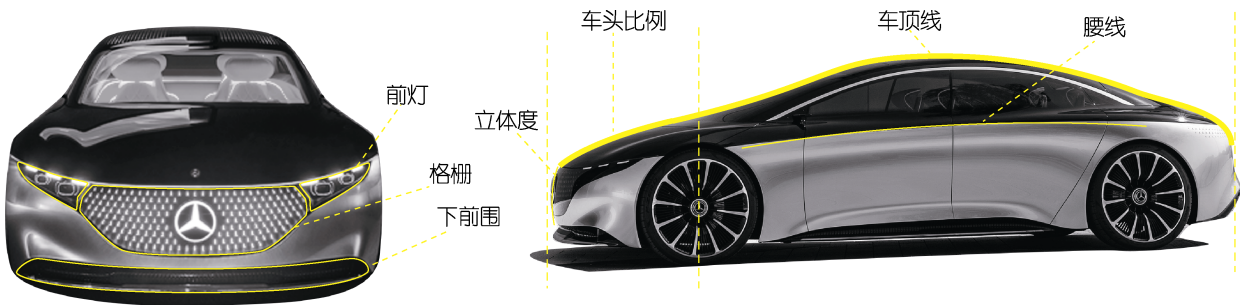


图 10 设计特征
Fig.10 Design features

表 2 联合分析结果
Tab.2 Joint analysis results

特征	特征水平	贡献率 u	权重 $q/\%$	特征	特征水平	贡献率 u	权重 $q/\%$
A 前灯	线性贯穿式 A_1	0.216	21.441	F 车头比例	正常 F_1	0.288	18.967
	凌厉式 A_2	-0.084			缩小 F_2	0.045	
	方正式 A_3	-0.311			极小 F_3	-0.333	
	圆润式 A_4	0.178					
B 格栅	普通封闭式 B_1	0.257	15.270	H 腰线	水平 H_1	0.055	13.596
	半隐式 B_2	-0.124			上扬 H_2	-0.018	
	无格栅 B_3	-0.133			双曲线 H_3	-0.038	
D 下前围	整体封闭式 D_1	-0.032	7.471	I 车顶线	梯形 I_1	-0.142	16.136
	几何造型 D_2	0.032			溜背 I_2	0.235	
E 立体度	圆润的 E_1	-0.006	7.118		流线型 I_3	-0.093	4.668
	立体的 E_2	0.006			常量		

以奥迪品牌电动汽车设计为例。在前脸的设计特征中，由于立体度主要表现为特征线的层次和立体感，侧面腰线也由曲面的凹凸感体现，因而前脸设计特征只描绘前灯、格栅、下前围；侧面特征将车头比

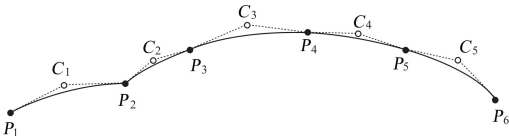
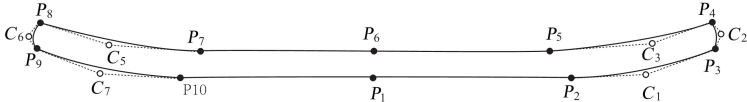
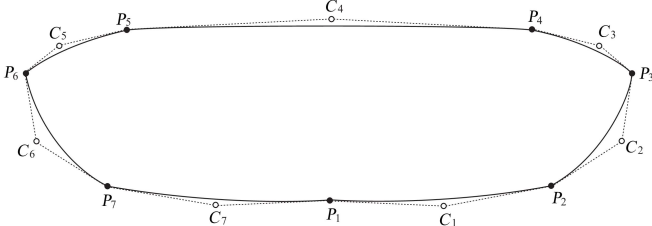
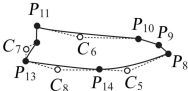
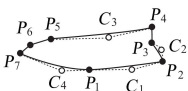
例和车顶线相结合，作为整体侧轮廓线的描绘。因此共建立前灯、格栅、下前围、侧轮廓线共四个部分。根据式（9）可知，认知参照点对应的特征水平为 $A_1, B_1, D_2, E_2, F_1, H_1, I_2$ ，结合样本中设计特征线的表达

表 3 特征线提取
Tab.3 Feature extraction

特征线提取与表达				
前脸特征 侧面特征				
				

进行贝塞尔曲线描绘，标记硬点和控制点^[29]。标记后的贝塞尔曲线以及修改性规则的坐标点约束如表 4 所示。

表 4 特征线描绘和修改性规则约束
Tab.4 Characteristic line drawing and modification rule constraints

贝塞尔曲线	修改性规则约束
	$p_1(y) < p_2(y); p_4(y) > p_3(y); p_5(y) < p_4(y);$ $p_2(x) > p_1(x); p_4(x) > p_3(x); p_5(x) > p_4(x);$
	$p_2(x) < p_3(x); p_5(x) < p_4(x); p_4(x) < p_3(x);$ $p_4(y) > p_3(y); p_4(y) > p_5(y); p_2(y) < p_3(y);$
	$p_3(x) > p_4(x); p_7(x) > p_6(x); p_2(x) > p_1(x);$ $p_2(y) > p_1(y); p_4(y) > p_3(y); p_6(y) > p_7(y);$
 	$p_6(x) > p_7(x); p_2(x) > p_3(x); p_2(x) > p_4(x);$ $p_6(y) > p_7(y); p_2(y) < p_3(y); p_4(y) > p_2(y);$

4.3 基于交互式遗传算法的辅助设计系统

基于交互式遗传算法建立辅助设计系统并在 MATLAB 软件中运行程序，交互界面如图 11 所示。

设置交叉概率为 0.7，变异概率为 0.006，迭代次数为 500， $k_a = 20, k_b = 10, c = 20, d = 10$ ，修改性规则约束输入如表 4 所示。偏好因子的阈值设置为 2 倍的品牌因子阈值，表示在考虑到品牌识别设计的同时较为注重新车型的设计创新，以获得更好的设计新颖性。算法根据进化代数是否满足适应值函数决定是否终止进化。经进化后，对满意解的坐标输出以及部分坐标参数如表 5 所示。

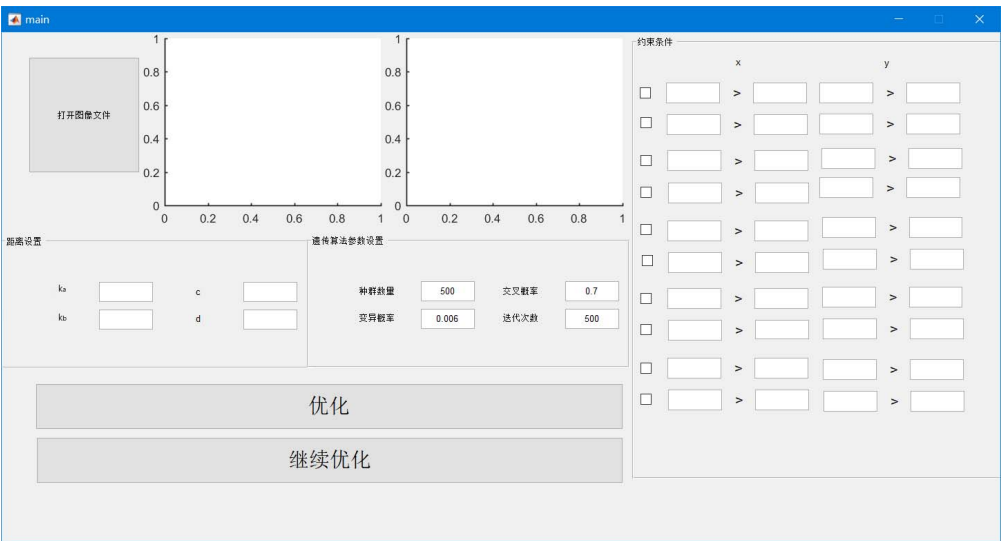


图 11 程序交互界面
Fig.11 Program interface

表 5 部分满意解坐标参数
Tab.5 Parts of satisfactory solution coordinate parameters

		x	y		
		x	y		
前大灯	下前围	188.363 2	970.669 3	1.0e+03*	
		169.822 0	819.782 8	0.120 4	1.258 8
		1.0e+03*		1.0e+03*	
		0.863 8	1.108 1	0.199 3	1.005 0
		940.614 5	999.414 5	1.0e+03*	
		1.0e+03*		0.143 2	1.153 4
		1.734 5	1.010 4	1.0e+03*	
		1.0e+03*		0.583 0	1.263 2
		1.728 3	1.086 7	1.0e+03*	
		1.0e+03*		0.805 7	1.071 8
格栅	侧轮廓线	2.573 4	1.001 1	1.0e+03*	
				0.969 1	1.152 0
		1.0e+03*		1.0e+03*	
		0.529 8	1.082 5	0.501 7	1.652 5
		1.0e+03*		1.0e+03*	
		0.847 6	1.543 5	1.120 1	1.450 9
		931.746 6	960.0931	1.0e+03*	
		1.0e+03*		1.495 2	1.233 4
		1.756 6	0.878 4	1.0e+03*	
		1.0e+03*		2.134 1	1.144 4
		1.768 0	1.654 2	1.0e+03*	
		1.0e+03*		2.704 1	1.318 4
		2.596 1	0.987 4		

4.4 模拟仿真分析及具体样式优化

根据满意解坐标参数描绘进化得到的造型特征线，首先基于侧面特征线建立理想低风阻体的三维模型并进行有限元分析，特征线如图 12 所示。

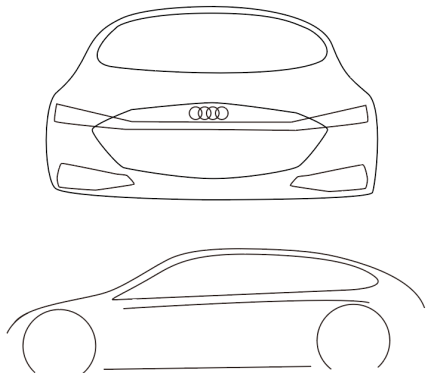


图 12 满意解的特征线描绘
Fig.12d Characteristic line depiction of satisfactory solution

在有限元分析的相关条件设置中，流场区域的横向空间为 10 倍的车身长度，宽度为 3 倍的车身宽度，纵向空间为 3 倍的车身高度，风速为 20 m/s。使用 mesh 工具对模型进行网格划分，湍流模型选择 k-epsilon(2 eqn)，选择 Second Order Upwind 方程进行

计算^[30]。结果采用 CFD-post 进行后处理，查看分析结果。车身压力云图分布状况，见图 13。

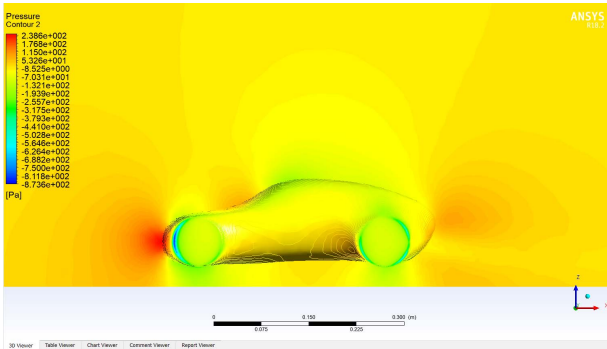


图 13 压力分布
Fig.13 Pressure distribution

前后压力差是组成车身总阻力的主要部分，由图 13 可知车身压力分布整体较为均匀，车头接受来自前方的气流阻滞静压达到最大为 $2.386 \times 10^2 \text{ Pa}$ 。其中较大的负压区域来自前轮边缘，机顶盖和车顶部分有较小的负压区域。气流走势见图 14，气流经过前轮保险杠时与车身分离明显，形成明显的负压区，根据分析可对前轮的保险杠拐角部分做进一步优化。速度矢量见图 15，气流在经过前脸及前挡风玻璃时流速下降，在机盖和车顶处流速加快，到达车辆尾部时产生涡旋。因此，后尾部保险杠部分和前保险杠部分可通过进一步修改细节进行整体优化，同时前机盖也可以适当降低，优化车身流场表现。

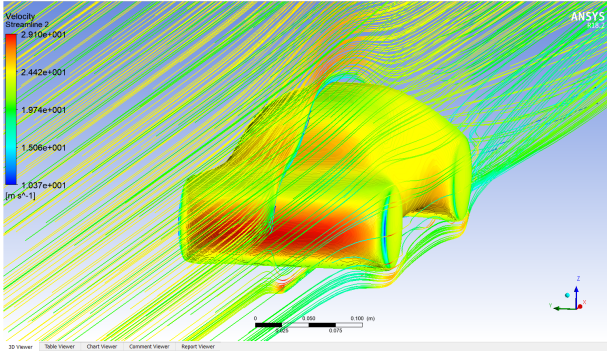


图 14 气流走势线
Fig.14 Airflow trend line

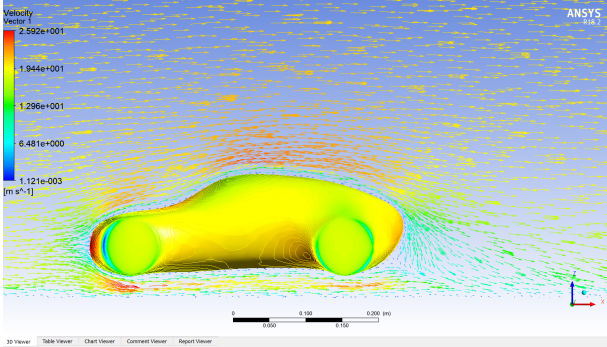


图 15 速度矢量
Fig.15 Velocity vector

将前保险杠部分的拐角调整圆滑,模型前机盖降低,后保险杠部分向外调整,再次在相同的条件下进行分析,结果见图16。最大压力降为 $2.36e^2$ pa,模型上最高空气流速由 25.92m/s 降低为 24.64m/s 。

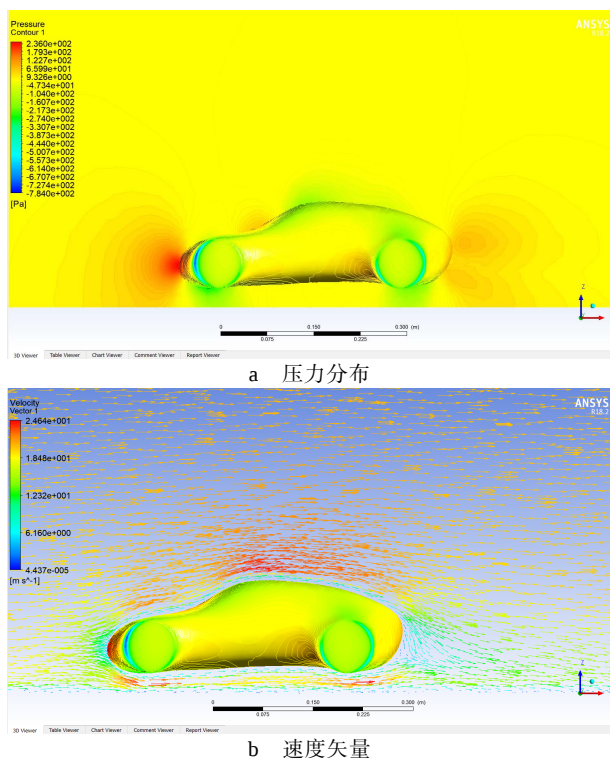


图16 优化后的分析结果
Fig.16 Analysis result after optimization

在理想低风阻体的基础上,根据得到的前脸特征线完成二维效果图优化,整体效果见图17。

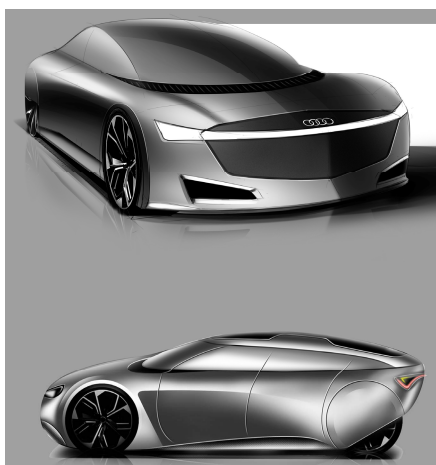


图17 设计效果
Fig.17 Design effect

4.5 用户满意度对比分析

将市场中已有的2019款奥迪Q2L e-tron作为对象1,最终设计效果作为对象2进行对比评价实验,

邀请之前受试者中的33人再次对设计方案的效果进行偏好和品牌识别两方面的满意度评价,统计结果见图18。

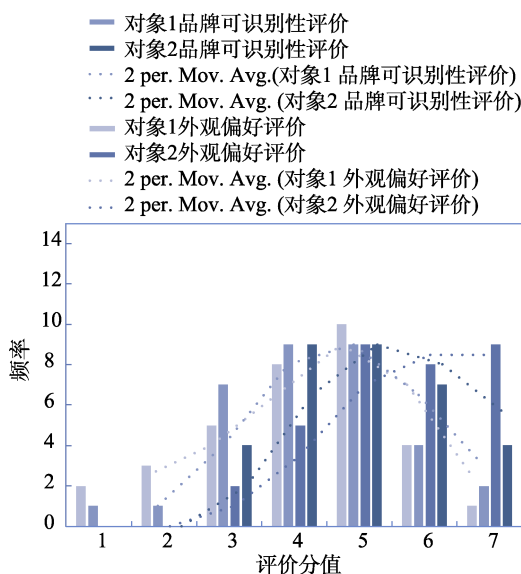


图18 评价结果的频数分布直方图
Fig.18 Frequency distribution histogram of evaluation results

图18中横坐标表示样本得到的评价分值,纵坐标表示方案得到某分值的频率。根据2周期移动平均趋势线分析可知,对象1的外观偏好和品牌可识别性评价得分集中在4~5分,对象2的2周期移动平均趋势线则较为靠右,得分集中在5~6分,因此对象2的用户满意度优于对象1。通过与已有车型的对比评价分析可知,大多数用户对设计效果比较满意,评价分值相对较高,用户的整体满意度相比原来的车型有所提高。

5 结语

当前的电动汽车设计,正在探索如何摆脱燃油车设计的束缚以形成自己的电动化设计语言,许多品牌已经做出有益的尝试。但汽车作为成本大且系统化极高的产品,设计也不能盲目创新,需要综合考虑消费者的偏好和可接受的程度,使品牌既可以得到传承又能让产品在市场得到消费者的认可。本文结合原型范畴理论从偏好的角度进行创新设计研究,利用参数化形状文法建立了辅助设计系统,提高了设计效率。通过具体案例验证了所提设计方法的可行性,相比于已有车型,设计的用户满意度有所提高,对传统汽车品牌在电动化领域的发展具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] OSTROSI E, BLUNTZER J B, ZHANG Zai-fang, et al. Car Style-Holon Recognition in Computer-Aided Design[J]. Journal of Computational Design and Engi-

- neering, 2019, 6(4): 719-738.
- [2] 李勇, 武银路. 纯电动汽车外饰造型影响因素及特征设计趋势研究[J]. 包装工程, 2020, 41(6): 72-80.
LI Yong, WU Yin-lu. Trend of Influencing Factors and Feature Design of Exterior Styling for Battery Electric Vehicle[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(6): 72-80.
- [3] 邓亚林, 刘宝乾, 尹欢. 基于形态特征线的电动汽车造型设计[J]. 包装工程, 2018, 39(10): 199-203.
DENG Ya-lin, LIU Bao-qian, YIN Huan. Design for the Modeling Design of Electric Vehicles Based on the Feature Line[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(10): 199-203.
- [4] 李勇, 马洪杰, 刘远哲, 等. 基于SPSD评价标准的纯电动汽车感性意象设计方法[J]. 机械设计, 2019, 36(3): 134-138.
LI Yong, MA Hong-jie, LIU Yuan-zhe, et al. Kansei Image Design Method of Battery Electric Vehicle Based on SPSPD Evaluation Standard[J]. Journal of Machine Design, 2019, 36(3): 134-138.
- [5] 赵静, 张琳. 基于形状文法的电动汽车品牌继承性设计方法[J]. 包装工程, 2018, 39(22): 151-156.
ZHAO Jing, ZHANG Lin. Design Method of Electric Vehicle Brand Inheritance Based on Shape Grammar[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(22): 151-156.
- [6] 张文泉, 赵江洪, 谭浩. 奥迪品牌发展与汽车造型特征研究[J]. 装饰, 2011(7): 75-77.
ZHANG Wen-quan, ZHAO Jiang-hong, TAN Hao. Research on the Formation of Audi Brand and Design Feature[J]. Art & Design, 2011(7): 75-77.
- [7] 赵丹华, 何人可, 谭浩, 等. 汽车品牌造型风格的语义获取与表达[J]. 包装工程, 2013, 34(10): 27-30, 61.
ZHAO Dan-hua, HE Ren-ke, TAN Hao, et al. Research on Semantic Acquisition and Expression of Car Brand Styling[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(10): 27-30, 61.
- [8] 李然. 汽车造型的原型范畴及拟合模型构建[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
LI Ran. Auto Styling Prototype Category and Fitting Model[D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [9] 刘慧薇, 朱娜. 家族相似性的原型理论在产品中的应用[J]. 机械设计, 2013, 30(5): 127-128.
LIU Hui-wei, ZHU Na. Application of the Prototype Theory on Family Resemblance in Product Design[J]. Journal of Machine Design, 2013, 30(5): 127-128.
- [10] 李然, 赵江洪. 基于类型分析的语义驱动汽车造型生成设计[J]. 包装工程, 2015, 36(6): 71-76.
LI Ran, ZHAO Jiang-hong. Semantic-Driven Car Generating Design Based on Type Analysis[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(6): 71-76.
- [11] 范馨月. 原型范畴理论视角下的中英概念隐喻对比研究——以汉英生命隐喻为例[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
FAN Xin-yue. A Contrastive Study of Chinese and English Conceptual Metaphor from the Perspective of Prototype Category—A Case Study of Chinese and English Life Metaphor[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [12] CHOWDHURY M, SALAM K, TAY R. Consumer Preferences and Policy Implications for the Green Car Market[J]. Marketing Intelligence & Planning, 2016, 34(6): 810-827.
- [13] GREEN P E, CARROLL J D, GOLDBERG S M. A General Approach to Product Design Optimization via Conjoint Analysis[J]. Journal of Marketing, 1981, 45(3): 17-37.
- [14] 程明宝, 王影, 邹美萍. 考虑消费者具有质量和价格偏好的双渠道供应链最优决策[J]. 运筹与管理, 2022, 31(6): 74-81.
CHENG Ming-bao, WANG Ying, ZOU Mei-ping, et al. Optimal Decision of Dual Channel Supply Chain with Consumer's Quality and Price Preference[J]. Operations Research and Management Science, 2022, 31(6): 74-81.
- [15] 王艳敏. 产品设计中的原型与注意力关联性研究[J]. 包装工程, 2018, 39(24): 199-203.
WANG Yan-min. The Correlation of Prototype and Attention in Product Design[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(24): 199-203.
- [16] 王伟伟, 杨延璞, 杨晓燕, 等. 基于形状文法的产品形态创新设计研究与实践[J]. 图学学报, 2014, 35(1): 68-73.
WANG Wei-wei, YANG Yan-pu, YANG Xiao-yan, et al. Method of Product Form Design Based on Shape Grammar[J]. Journal of Graphics, 2014, 35(1): 68-73.
- [17] GRASL T, ECONOMOU A. From Shapes to Topologies and Back: An Introduction to a General Parametric Shape Grammar Interpreter[J]. Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, 2018, 32(2): 208-224.
- [18] JOWERS I, EARL C, STINY G. Shapes, Structures and Shape Grammar Implementation[J]. Computer-Aided Design, 2019, 111: 80-92.
- [19] LEE H C, HERAWAN T, NORAZIAH A. Evolutionary Grammars Based Design Framework for Product Innovation[J]. Procedia Technology, 2012, 1: 132-136.
- [20] CHAU H H, MCKAY A, EARL C F, et al. Exploiting Lattice Structures in Shape Grammar Implementations[J]. Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, 2018, 32(2): 147-161.
- [21] BOTSCH M, SORKINE O. On Linear Variational Surface Deformation Methods[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2008, 14(1): 213-230.
- [22] 马瑞, 陈瀚利, 穆晓鹏, 等. 基于形状文法的工程自卸车前脸造型设计研究[J]. 太原理工大学学报, 2019, 50(5): 635-640.
MA Rui, CHEN Hao-li, MU Xiao-peng, et al. Research on the Front Face Design of Engineering Dump Truck Based on Shape Grammar[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2019, 50(5): 635-640.