基于象元运算的轮毂形态设计方法研究

吴俭涛，袁放，孙利
（燕山大学，秦皇岛 066004）

摘要：目的 为了使轮毂形态设计的过程更加简洁和直观。**方法** 以五辐轮毂为例，基于产品象元理论中的象元运算法则，运用参数化建模等相关方法和技术，首先，根据轮毂象元的运算法则，对轮毂的合成象元库进行扩充，构建出较为完善的轮毂产品象元库；然后，基于象元库和轮辐形态的变换种类，实现新的轮毂形态的设计目标；最后，运用该设计方法进行轮毂形态设计，证实该方法具有可行性。**结果** 研究了一种简化有效的轮毂形态的创新设计方法。**结论** 运用象元理论，以一种模块化的方式实现轮毂产品新形态的生成，对于提高轮毂产品设计效率、开辟形态设计新方法具有一定的参考价值及借鉴意义。

关键词：产品象元理论；象元运算法则；轮毂造型；形态设计方法
中图分类号：TB472 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2018)24-0163-09
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.24.030

Method of Wheel Form Design Based on Operation of Meta Symbol

WU Jian-tao, *YUAN Fang*, *SUN Li*
(Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

ABSTRACT: The work aims to make the process of wheel form design simpler and more intuitive. With 5-spoke wheels as an example, based on operation rules of the product Meta symbol theory, the parametric modeling method and other related methods and technologies were applied. First of all, the composite-meta symbol library of the wheel was extended according to the operation rules of the wheel Meta symbol, and a more complete wheel Meta system library was constructed. Then, based on Meta symbol library and transformation types of spoke form, the design goal of creating new wheel forms was achieved. Finally, the proposed design method was used for the wheel form design, which confirmed that the proposed method was feasible. A simplified and efficient innovative design method of wheel form was researched. The new wheel forms are generated based on the meta symbol theory by means of modularization, and they have certain reference value and significance for improving the efficiency of wheel design and creating new form design methods.

KEY WORDS: the theory of product Meta symbol; operation rules of Meta symbol; wheel form; method of form design

轮毂是影响着汽车整体形象、彰显自身品位与身份的重要构成元素[1]，已成为各大厂商和设计师不可忽视的重点。在轮毂的造型设计阶段，传统的设计方式需要进行头脑风暴、手绘、修改、建模等一系列工作[2]，设计结果依赖于设计师的感性思维和经验累积，过程较为繁琐且无规律可循。近年来，有关轮毂产品的形态设计方法的研究取得了一定的成果[3−5]，但目前相关研究多为有关于有限元理论下的轮毂造型设计方法的研究，且设计过程多遵循现有固定设计流程下的设计方法[6]，以创新设计方法实现轮毂形态设计的研究几乎为零。本文提出的轮毂形态设计思路，既能够辅助设计师，又能够应用于面向消费者的轮毂产品造型的个性化定制[7]，是当下设计的 趋势和市场需求的使然。

收稿日期：2018-08-21
基金项目：国家自然科学基金资助项目（51675464）；燕山大学博士基金（BS17001& No.B1008）；燕山大学教学改革项目（TSQ2017011）
作者简介：吴俭涛（1976—），女，河北人，博士，燕山大学教授，主要研究方向为汽车轮毂智能定制设计。
通信作者：孙利（1973—），男，河北人，博士，燕山大学教授，主要研究方向为轮毂个性化定制理论与方法。

1 产品象元理论

1.1 产品象元概述

象元这一名词在电子学、光学、计算机图象处理等领域均有相关概念与研究，在吴俭涛的《基于象元的形态设计方法及其应用研究》中，首次提出了表示物体形态的产品象元概念，并与产品的造型设计相结合，提出了适用于产品形态定制的象元形态设计方法。

物体的整体形态特征称为象，表征形态局部和单一特征的不可再少的形式元素集合称为象元。象元是物体的形态变化特征基因，既决定着物体二维形态的呈现，也影响着三维形态的变化，物体的整体形态随象元的变换而变化，其形态的复杂程度不同，象元数量也不同[8]。在该研究中，将象元分为五大类，不同类型的产品以及同一产品间的不同款式和种类，对应的具体象元符号形式和数量都是不同的。

1.2 轮毂象元构成

基于象元的特征，将象元表达法应用于汽车轮毂产品，从大量的轮毂图像信息中获得轮毂基本形态特征及组合变化特点，对轮毂进行象元的提取，最终确定轮毂的象元符号和象元构成。在该研究中，将轮毂基本象元分为五大类，分别是表达轮毂基本结构形式特征和轮毂辐面大小特征的骨——面象元，表达轮毂运动特征和动——静象元，表达轮辐数量变化特征和轮辐形态变化趋势特征的量——势象元，表达轮毂形式种类特征和局部细节特征的共——个象元，以图像形式呈现的表达具体轮毂形体特征和根据轮毂产生联想的本体—喻体象元[8]。

1.3 象元运算法则

象元间具有多种关联关系，不同的关联关系决定了象元间的各种切换与转化，也决定了三维形态相应的各种变化。建立象元关联关系的过程和规则称为象元运算[8]。象元运算是象元变换的基础和前提，也是基于象元的形态设计方法产生的基本依据。如果将不同类象元看作不同的象元集合，象元运算则是建立不同象元集合间的各种映射关系。象元间的运算依循一定的运算法则，有其特定的表示符号、运算符和数学公式。

轮毂象元具有替换运算、合并运算和插值运算三大运算，分别遵从单选律、加合律和差分律。依据前 3 种运算法则进行单一运算，得到的解的象元形态都较为简单，只有较为基础的轮毂造型上的设计，没有细节上的修饰和整体造型的考量，因此想要得到符合消费者审美需求的轮毂造型，需要综合运用 3 种运算法则，即混合运算。

2 象元库的扩充与组成

2.1 轮毂象元库

轮毂产品的象元库是实现轮毂形态设计的基础[9]，包含三大部分：轮毂产品样本库、轮毂象元库和三维模型库。其中，轮毂产品样本库为收集到的轮毂产品的图片，可作为本体象元。轮毂象元库由基本象元库、合成象元库、复合象元库和个象元库构成，见图 1。基本象元库包括五大类基本象元；合成象元库包括只经过一种运算的合成象元，即经过合并运算的合成象元和经过插值运算的差分象元；复合象元库中包括与轮毂产品样本库中的轮毂产品相对应的复合象元，以及基于运算法则，在复合象元基础上通过 3 种运算和混合运算得到的新的轮毂复合象元形态；个象元库中包含对轮毂起到修饰作用的个象元，个象元的形态有很多，如 PCD 孔的数量、相对大小和位置，中心孔盖形状，以及具有多重特殊的轮辐轮廓与形状等。三维模型库是研究团队前期通过三维扫描技术，获取轮毂产品象元库中相应轮毂的三维形态数据，转化成为 3D 模型导入到 Rhino 里，整合得到的轮毂模型库。

复合象元经过各个级别的变换得到的新的复合象元形态间是一一对应的映射关系。轮毂产品象元库中包含的轮毂产品图、轮毂象元和三维模型均已嵌入到 Rhino 软件中。

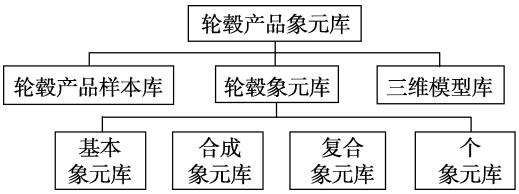


图 1 轮毂象元库构成

Fig.1 The composition of wheel Meta symbol library

2.2 复合象元的形态变换

轮毂复合象元决定着轮毂的正面造型，轮毂正面形态的变换可通过基本象元间的象元运算实现。根据参与运算的基本象元种类，和运算得到的轮毂复合象元结果，将轮毂复合象元的形态变换分为 5 种变化路径：轮辐宽度变换、动态变换、辐条样式变换、轮缘走向变换和轮辐数目变换。辐条样式又分为辐条形状变换和辐条体量变换。

轮毂复合象元的形态变换是通过样本轮毂包含的基本象元，与本身包含的基本象元之外的其他象元进行替换、合并、插值运算实现的，每种形态变换对应的象元运算种类见图 2。其中在轮辐数目变换上，象元理论将轮辐数为 5 的整数倍的轮毂归在五辐轮毂种类之下，本文选取五辐和十幅两种较为常见的类别进行研究。

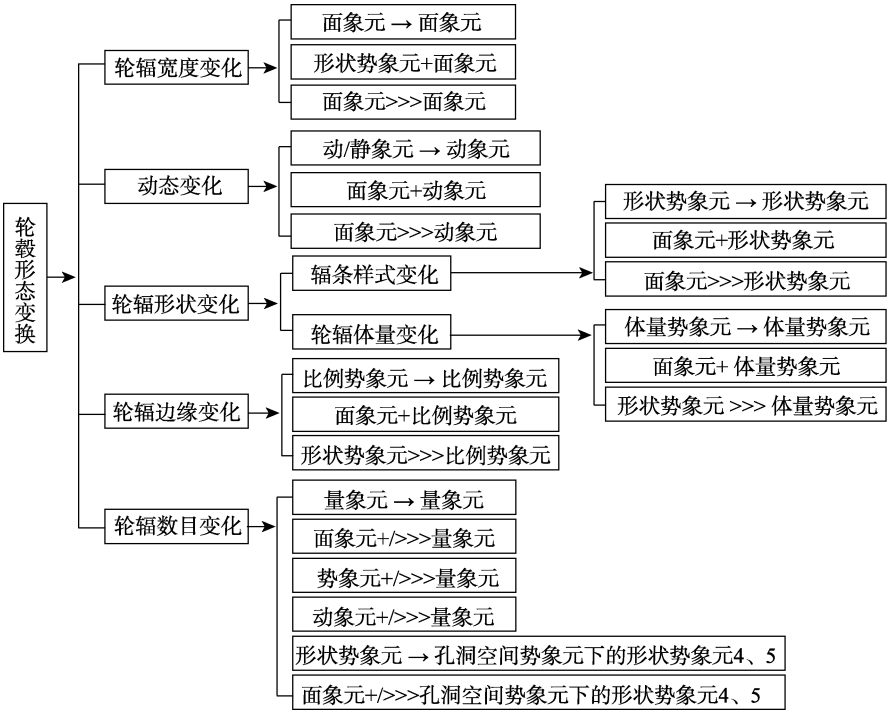


图 2　轮毂形态变换对应的象元运算种类

Fig.2 The corresponding meta-symbol-operation type of wheel form transformation

一个轮毂复合象元，最多进行四级形态变换，轮毂形态的变换路径见图 3。当通过运算得到的复合象元，同时具有 3 种不同种类的形状势象元，一种是体量势象元，一种是比例势象元，一种是动象元，象元运算即达到饱和状态，以该轮毂复合象元为基础的轮毂象元形态变形全部完成。

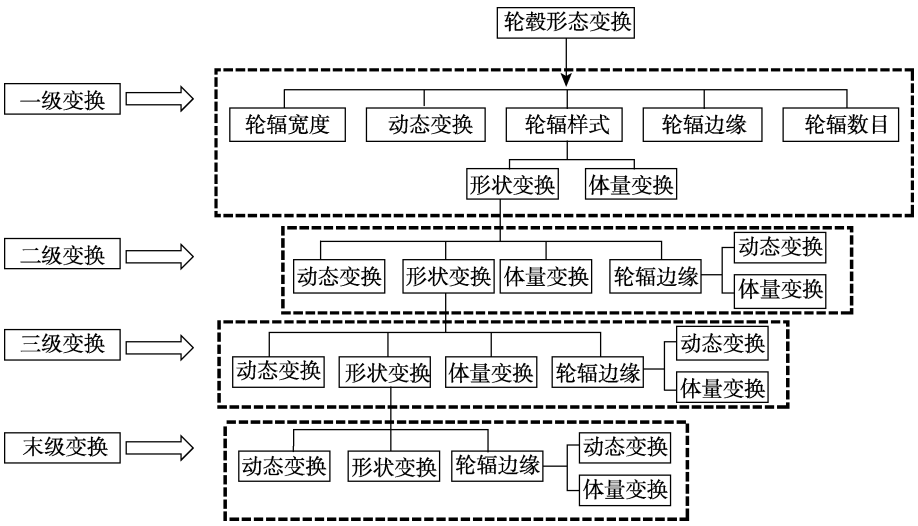


图 3　轮毂形态的变换路径

Fig.3 Wheel form transformation path

2.3　复合象元库的构建

在整个轮毂产品象元库中，复合象元库是拓展象元库的应用、实现轮毂形态设计的关键。复合象元库的扩充与构建是前期研究的基础与重点工作，主要依据轮毂象元的形态变换路径进行。复合象元库的扩充方式见图 4。

以轮毂 α 为例进行说明，轮毂 α 见图 5，其复合象元为 Ai，A 代表 Ai 包含的基本象元的集合，见图 6。首先提取轮毂 α 的基本象元，见图 7，其中 A8 不存在。

一种形态的轮毂复合象元，一定对应着一种骨象元、一种面象元、一种量象元、一种体量势象元、一种共象元，动——静象元一般只有一种，比例势象元和形状势象元由本体轮毂形态的复杂程度决定，一个轮毂只能具有一类空间势象元下的一种形状势象元，因此参与运算的形状势象元个数在 1~4 之间。个象元

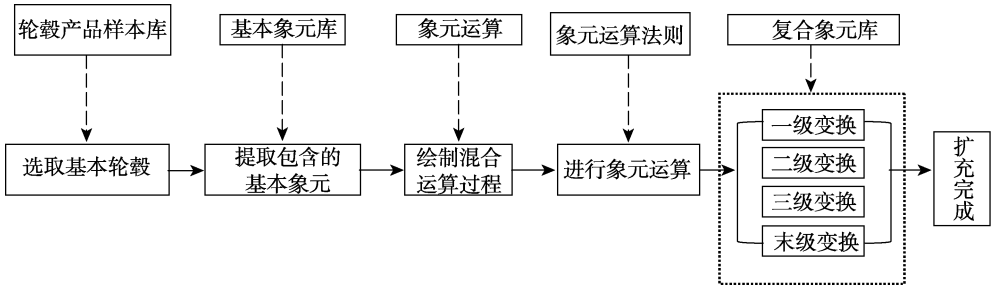


图 4 复合象元库扩充方式

Fig.4 Expanded mode of complex meta symbol library



图 5 轮毂产品 α

Fig.5 The wheel α

$$A \subseteq \begin{pmatrix} \text{骨象元 } A1 \\ \text{面象元 } A2 \\ \text{动(静)象元 } A3 \\ \text{量象元 } A4 \\ \text{空间势象元 } A5 \\ \text{形状势象元 } A6 \\ \text{体量势象元 } A7 \\ \text{比例势象元 } A8 \\ \text{共象元 } A9 \\ \text{个象元 } A0 \end{pmatrix}$$

图 6 A 的集合

Fig.6 Collection A

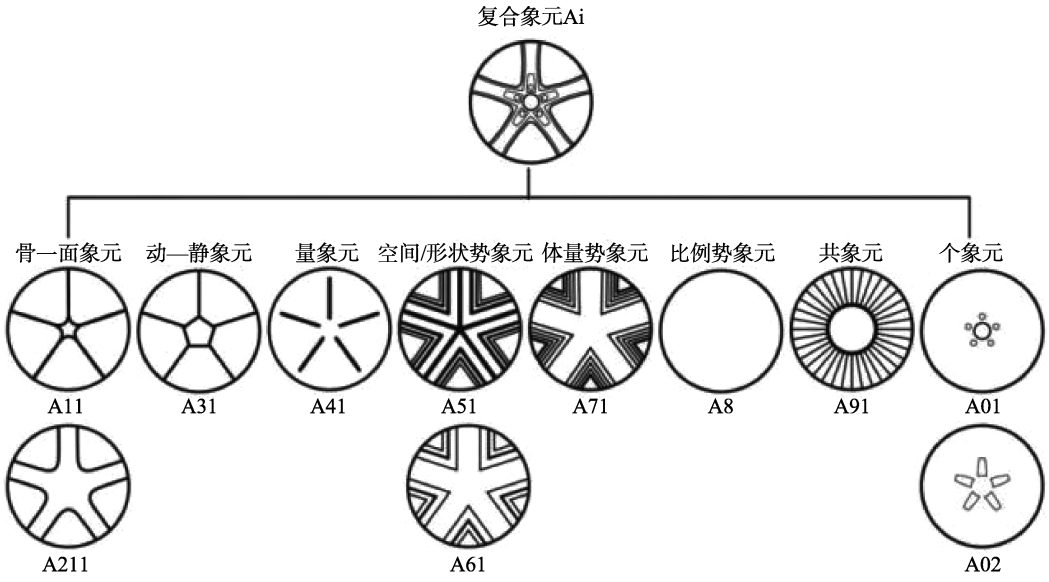


图 7 复合象元 Ai 包含的基本象元

Fig.7 The basic meta symbol that complex meta symbol Ai contains

的数目和形态由本体轮毂的造型特征和复杂程度决定。轮毂复合象元中包含的基本象元，一定会影响轮毂的形态，但不一定会体现在运算过程中，如静象元、量象元、共象元有时不参与运算；另外，运算过程中要根据轮毂形态的特点，决定参与运算的基本象元和运算的过程，如当紧缩空间势象元下的形状势象元 1 和体量势象元 1 同时存在时，体量势象元不参与运算。

根据提取出的基本象元种类，绘制轮毂 α 的复合象元 Ai 的混合运算过程，得到其运算公式，Ai 的混合运算过程见图 8。轮毂个象元表达轮毂细节特征，个象元的变换只是局部上的变动，不会影响轮毂的整体造型，因此可不参与初步的运算过程，在整体正面

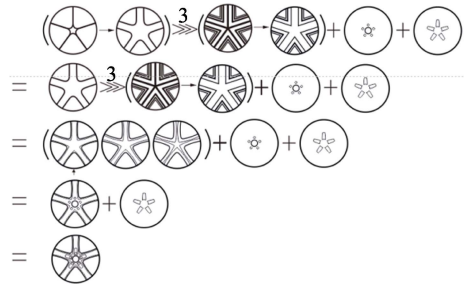


图 8　Ai 的混合运算过程
Fig.8 The hybrid operation process of Ai

造型确定后添加。

根据象元的运算法则和形态变换的种类，要对基本象元依次进行一级、二级、三级和四级的变换，通过三大运算实现对轮毂的轮辐宽度变换、动态变换、轮辐形状变换、轮辐边缘变换和轮辐数目变换，其运算路径见图 9—13。

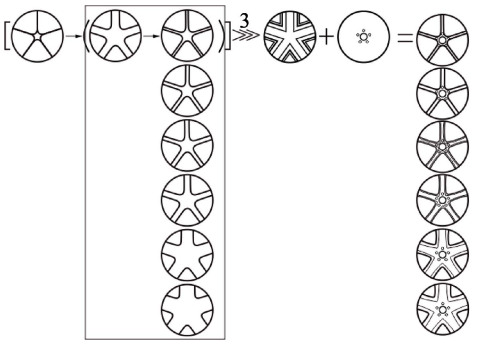


图 9　轮辐宽度变换运算
Fig.9 The path of spokes width transformation

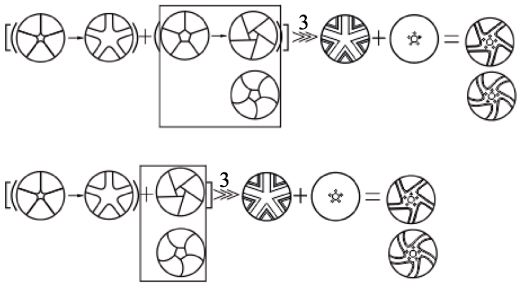


图 10　动态变换运算路径
Fig.10 The path of dynamic transformation

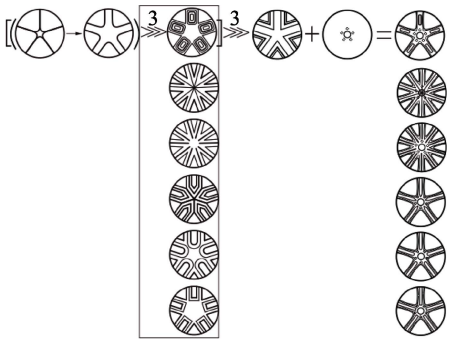


图 11　轮辐形状变换运算路径
Fig.11 The path of spokes shape transformation

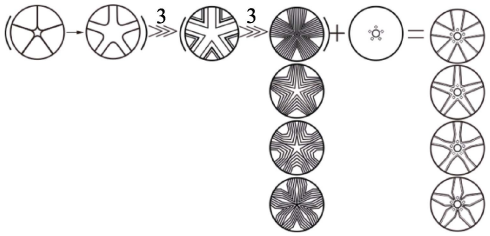


图 12　轮辐边缘变换运算路径
Fig.12 The path of wheel rim trend transformation

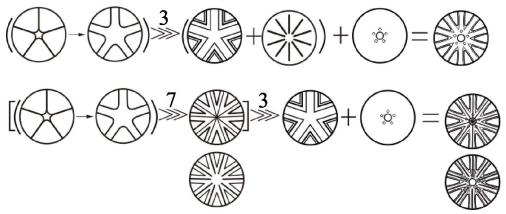


图 13　轮辐数目变换运算路径
Fig.13 The path of spokes number transformation

运算过程中，插值运算的最大插值度为 7，为了简化运算过程，同时保证结果的合理性和准确性，默认选择插值运算的插值度为 3，结果取中间值。

在通过象元运算得到的复合象元绘制过程中，会存在不同运算种类，得到同样形态的复合象元情况，由人工进行筛选。当复合象元的形态变换达到饱和状态，象元运算结束，基于该轮毂样本的复合象元扩充完成。对轮毂产品样本库中的轮毂重复进行以上步骤，最终得到较为完整和完善的复合象元库。

3　轮毂形态快速设计方法

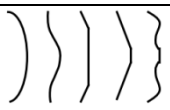
3.1　轮毂造型模块

轮毂的形态特征可总结为 6 个设计要素：构成方式 、螺栓孔种类、轮辐正面造型、轮辐数目、轮辐边缘处理和中心盘面造型[10]，轮毂的复合象元代表了轮毂形态特征中的构成方式、螺栓孔种类、轮辐正面造型和轮辐数目，因此将轮毂造型设计过程分为 4 个模块[11]：正面造型生成、轮辐轮缘搭接方式选取、侧面片形状确定和细节调整。轮辐轮缘的搭接方式分为外接和内搭式两种，见表 1，侧面片形状可分为平面、内凹、外凸 3 种[12]，每种对应的轮毂侧面剖面形状见表 2。

表 1　轮辐搭接方式
Tab.1 The way rim contacts

外搭式	内接式
	

表 2 轮毂侧面片形状
Tab.2 Wheel side form

平面	内凹	外凸
		

3.2 设计流程

在轮毂样本库中选定一种基本样式轮毂，随即生成与之对应的轮毂复合象元，根据设计需求选择一种象元变换种类，如轮辐形状变换，得到与之对应的复合象元集合，在该集合中选择一款中意的复合象元形态，即完成一级变换。该变换过程最多经过四级，变换的级别和种类可根据需要进行跳转。整体正面造型确定后，对选定的复合象元进行个象元的添加，在个象元库中选择个象元形态，如螺栓孔种类和数量等，正面造型确定完成。接下来选择轮辐与轮辋的搭接方式，选择轮毂侧面片的造型，每种搭接方式和侧面造型都有与之对应的利用 Grasshopper 插件、设定好设计参数的犀牛三维模型。三大模块选定之后，利用 Grasshopper 中的点阵导入功能将最终的轮毂复合象元的线形轮廓转化为点阵图形，进而通过 Grasshopper 电池图的运算形成三维模型形态，即可生成轮毂的三维模型（该过程在 Grasshopper 电池图中自动运算完成）[13]。模型生成后，进入局部细节调整阶段，根据设计师个人的喜好和设计的需求，可直接利用犀牛软件的建模功能对模型细节进行调整，如轮辐边缘的导角大小、轮毂盖的凸起高度等[14]。调节完成后，轮毂新形态设计完成。整体轮毂的设计流程见图 14。

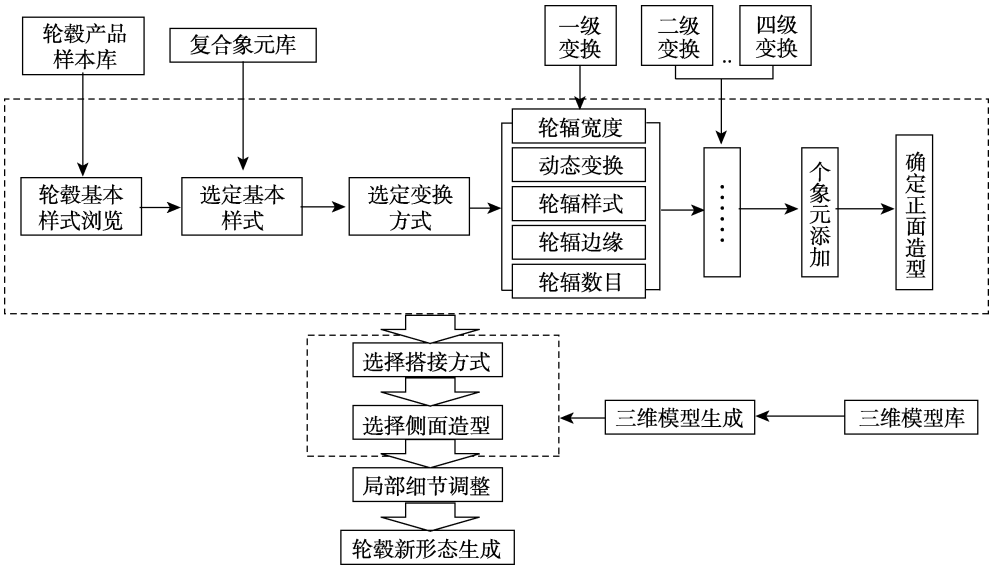


图 14 轮毂形态设计流程
Fig.14 The wheel form design process

3.3 可行性验证

针对该设计方法的特点，设计相应的实验，根据设定的影响因素、受测人群、实验方法等进行实验，并对实验所得数据进行统计和分析。运用访谈法和调查问卷法，对受测者进行访谈和调查问卷的数据分析，通过对该实验结果的分析与定性定量研究，证实了基于象元运算的轮毂形态设计方法的可行性与优势性，相较于传统的设计流程，该方法能够提高设计效率，达到辅助设计师进行轮毂形态设计与调整的目的，并且受测者对于设计过程的流畅度和最终方案的满意程度都较高。

4 实例验证

4.1 需求设定及设计流程体验

根据该设计方法的特性与设计目标，找到一位典型设计师用户作为受测者，通过对目前轮毂造型设计、轮毂市场的走势等调研分析，设定设计目标，为某品牌家庭轿车设计一款大气、稳重，具有一定动感和品质感的轮毂，消费定位为中档。

首先打开 Rhino 软件，在指令处输入 Grasshopper 并打开草蜢插件，在 Grasshopper 工具栏中嵌入已构建完成的轮毂产品象元库，打开建立完成的电池图的逻辑关系文件。在嵌入的轮毂产品样本库中选择一个基本轮毂样本，左侧随之出现与之对应的复合象元。选中的轮毂处于黄色放大高亮状态[15]，选定的基本轮毂见图 15。

根据设计需求递进选择各层级中的变换方式，见图 16—17，选择一级变换中的形状变换和二级变换中的轮缘变换和动态变换，选中的复合象元处于红色状态，右侧实时显示选中象元的形态。

整体造型确定后添加个象元，最终复合象元形态变换完成，见图 18。最后选择轮辐轮缘间的搭接方

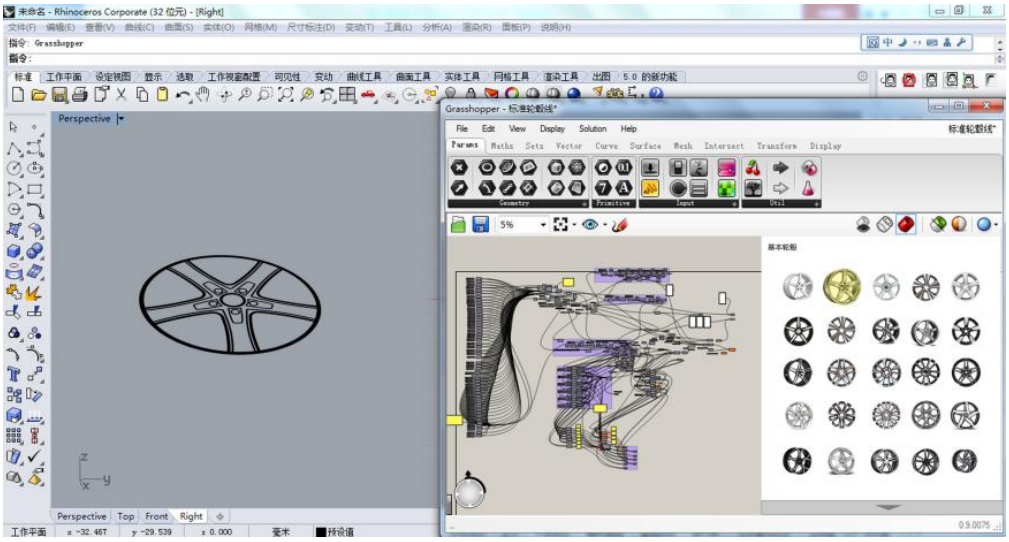


图 15　选定的基本轮毂

Fig.15 Select the basic wheel

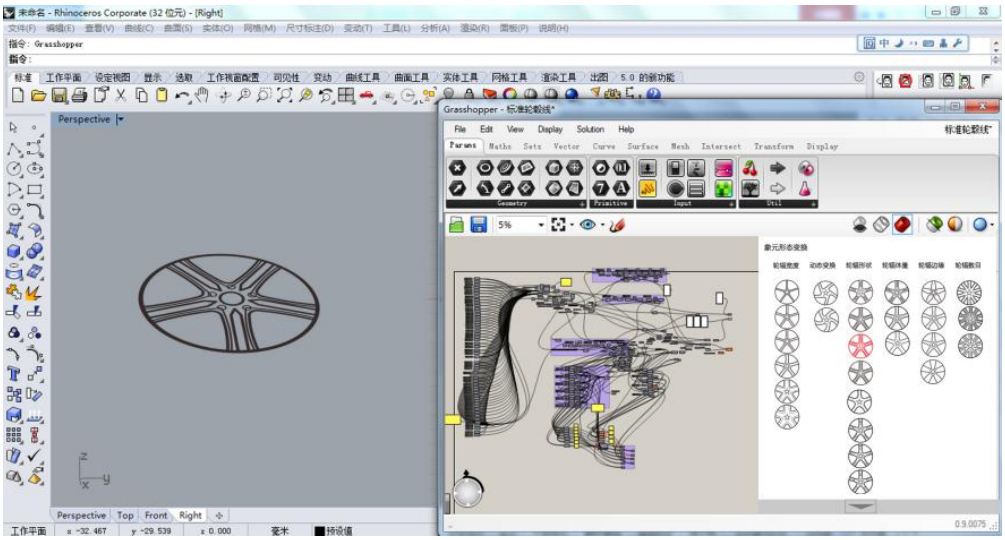


图 16　复合象元一级变换

Fig.16 The Primary transformation of complex meta symbol

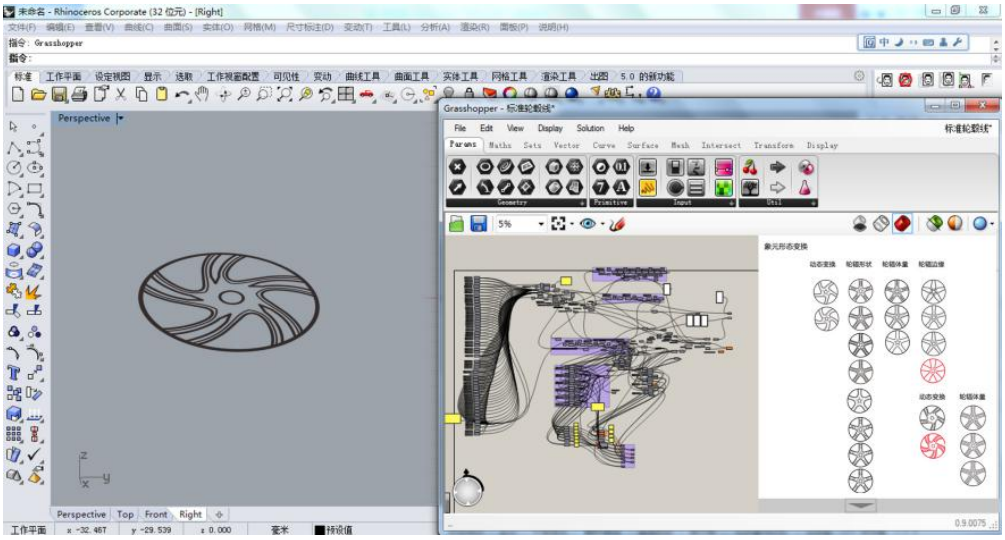


图 17　复合象元二级变换

Fig.17 The secondary transformation of complex meta symbol

式和轮毂侧面片的形状，见图 19，选择外接式和内凹种类下的第 3 种形态，选中的处于黄色高亮放大状态。确定后，通过 Grasshopper 电池图的运算形成三维模型形态，轮毂造型的设计初步完成。

根据最初的设计需求和目前呈现出的轮毂形态效果，设计师接下来可对生成的模型进行细节的变换和调整，见图 20，直至达到满意状态。最终得到的轮毂造型见图 21，轮毂的形态设计完成。

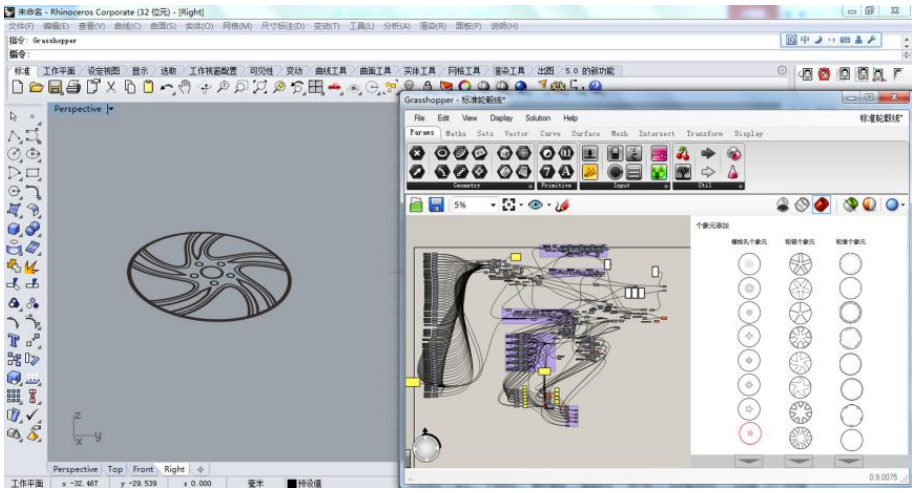


图 18 个象元的添加

Fig.18 The Individual meta symbol addition

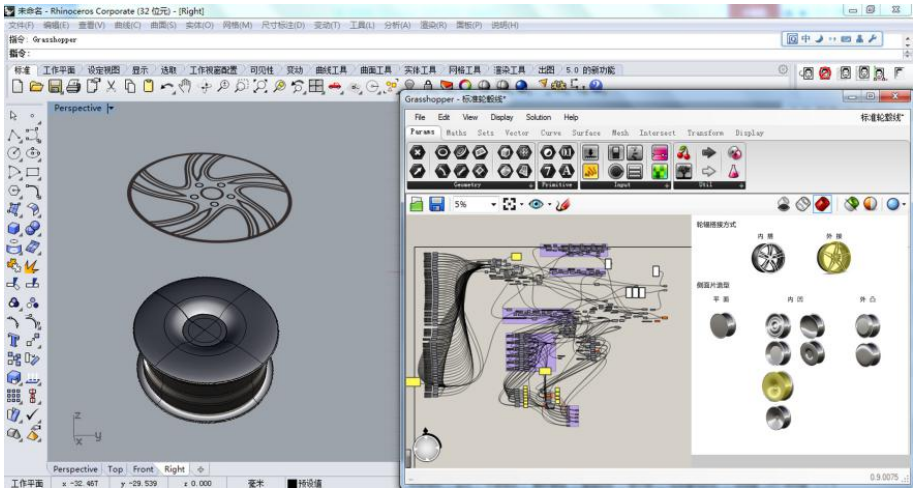


图 19 搭接方式和侧面造型选择

Fig.19 The connection type and profile shape selection

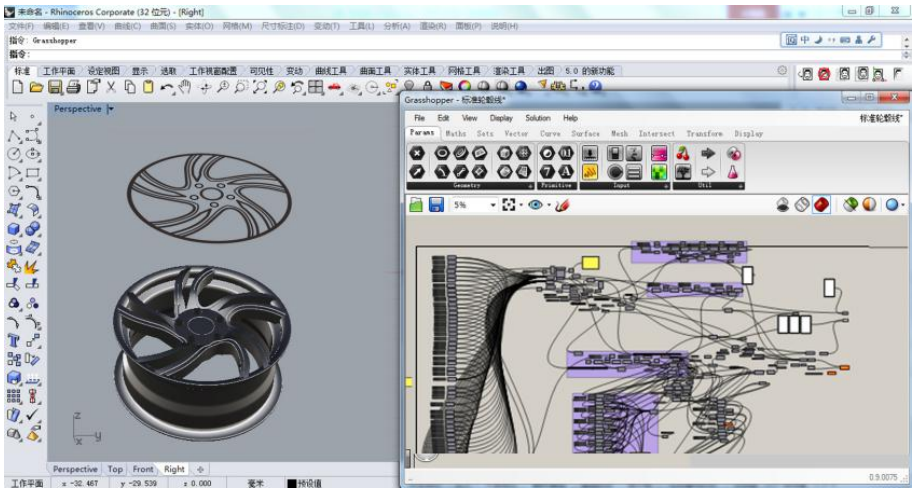


图 20 局部细节调整

Fig.20 Local details adjustment



图 21　轮毂的最终造型
Fig.21 The final wheel form determination

4.2　设计方案评价

设计完成后，采用问卷调查法，选取一定数量的设计师、轮毂厂商、消费者人群对该方案进行评价与评分，通过定量研究方法对得到的数据和结果进行分析研究，最终得出该设计方案的轮毂模型形态符合最初的设计目标且具有一定的美观性，证明了该设计方法的有效性与设计方案的合理性。

5　结语

本文提出了一种基于象元理论的全新的轮毂造型设计方法，将运用象元理论和象元运算法则建立起的轮毂产品象元库，应用到轮毂产品的形态设计当中。结合当前的设计趋势和对于轮毂形态的需求，以五辐轮毂为例，通过计算机辅助设计技术等手段，对轮毂的形态设计方法进行研究。研究结果能够改变传统的设计方式，简化轮毂形态的设计方法，使设计师设计出符合消费者需求的轮毂造型。降低了设计门槛，具有较强的实用价值和广阔的应用前景。

参考文献：

[1] LUO Shi-jian, FU Ye-tao, ZHOU Yu-xiao. Perceptual Matching of Shape Design Style between Wheel Hub and Car Type[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2012, 42(1): 90—102.

[2] JAYAKIRAN R E, SRIDHAR C N V, PANDU R V. Research and Development of Knowledge Based Intelligent Design System for Bearings Library Construction Using Solidworks API[J]. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2016, 385(8): 311—319.

[3] 康淑贤. 汽车轮毂造型与轻量化设计方法研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2013.
KANG Shu-xian. Study on Method of Automobile's Wheel Modelling and Lightweight Design[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2013.

[4] 陈雪娇. 小型轿车轮毂造型设计研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2014.
CHEN Xue-jiao. Research on Modeling of Small Car Hub Designing[D]. Xi'an: Shanxi University of Science & Technology, 2014.

[5] 刘真. 基于整车形态的轮毂造型设计与结构分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
LIU Zhen. Based on the Vehicle Shape About the Design and Structural Analysis of the Wheel[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.

[6] SUN Dan. Non-realistic shape modeling method to the product design based on graphic intelligence Boletin [J]. Tecnico Technical Bulletin, 2017(4): 183—192.

[7] 周冬冬, 王国栋, 肖聚亮, 等. 新型模块化可重构机器人设计与运动学分析[J]. 工程设计学报, 2016, 23(1): 74—81.
ZHOU Dong-dong, WANG Guo-dong, XIAO Hong-liang, et al. Design and Kinematics Analysis of New Modular Reconfigurable Robot[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2016, 23(1): 74—81.

[8] 吴俭涛. 基于象元的形态设计方法及其应用研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.
WU Jian-tao. Form Design Method and Application Basede on Meta Symbol[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2016.

[9] DENG Li-yi. Application of Parametric Modeling in Optimization Design on Aluminum Alloy Wheels[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012(5): 2834—2836.

[10] 陈永亮. 轮毂智能形态修正系统设计与研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.
CHEN Yong-liang. Hub Intelligent Shape Correction System Design and Research[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2015.

[11] NAN Peng-cheng, XU Jing.Mechanical Product Analogy Design Method Based on Structure Similarity[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 127(12): 320—326.

[12] 孙利. 铝合金轮毂设计的技术美学基础及应用研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.
SUN Li. The Technical Aesthetics Foundation and Application Research on Aluminum Alloy Wheel Design [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014.

[13] 戴欣伟. 基于 Grasshopper 的参数化设计在产品设计中的应用探索[J]. 设计, 2016(11): 122—123.
DAI Xin-wei. The Application and Exporation of Parametric Design Used in Product Design Based on Grasshopper[J]. Design, 2016(11): 122—123.

[14] 罗仕鉴, 李文杰, 傅业焘. 消费者偏好驱动的 SUV 产品族侧面外形基因设计[J]. 机械工程学报, 2016, 52(2): 173—181.
LUO Shi-jian, LI Wen-jie, FU Ye-tao. Consumer Preference-driven SUV Product Family Profile Gene Design [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(2): 173—181.

[15] 吴晓莉, 薛澄岐, 王海燕, 等. 复杂系统人机交互界面的 E-C 映射模型[J]. 机械工程学报, 2014, 50 (12): 206—212.
WU Xiao-li, XUE Cheng-qi, WANG Hai-yan, et al. E-C Mapping Model Based on Human Computer Interaction Interface of Complex System[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50 (12): 206—212.