基于认知思维和蛛网结构的产品形态创新设计研究

苏建宁，沈宇浩，杨文瑾，张书涛
（兰州理工大学，兰州 730050）

摘要：目的 结合设计师和用户的认知思维，基于蛛网结构建立两者之间的认知平衡模型并开发实用的创新设计工具，使产品形态设计的过程更为简明直观。**方法** 首先运用形态分析法提炼产品形态原型，通过类型学分析对设计方案进行分类，模拟蜘蛛建网行为，建立体现设计师认知的产品方案表征蛛网；然后采用访谈调研、口语分析的方法获取用户语义，对核心语义词汇进行审美逻辑上的形态关联分析，提取符合用户认知的撞击物形态；最后使用四边形网格描述产品方案和撞击物形态，借助形态融合技术生成创意产品形态，建构蛛网撞击进化设计系统，并以女性滑板车设计为例验证该方法的可行性。**结果** 模拟并应用了认知思维和蛛网结构，提出了一种新的产品形态创新设计方法。**结论** 蜘蛛建网、猎物撞击的行为和方式能够比较合理地模拟设计师和用户的认知平衡过程，该方法对于提高产品形态设计效率，开拓创新设计方法具有一定的参考价值和借鉴意义。

关键词：认知思维；蛛网结构；产品形态；创新设计
中图分类号：TB472 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2021)02-0014-08
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.02.003

Product Form Innovation Design Based on Cognitive Thinking and Cobweb Structure

SU Jian-ning, SHEN Yu-hao, YANG Wen-jin, ZHANG Shu-tao
(Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

ABSTRACT: The work aims to build a cognitive matching model between designers and users based on the cobweb structure by combining their cognitive thinking and develop a practical innovative design tool to make the process of product form design more compendious and intuitive. Firstly, the product form prototype was refined by morphological analysis, and the design schemes were classified based on typological analysis. The product schemes characterizing cobweb which reflected the designer's cognition was established by simulating the behavior of spider constructing webs. Then interview survey and oral analysis were conducted to obtain user semantics. The core semantic vocabularies were transformed into product forms based on the morphological association analysis according to aesthetic logic, so as to extract the impactor's form meeting the user's cognition. Finally, the product schemes and the impactor's form were described with quadrilateral grids, and creative product forms were generated with the aid of shape blending technology. The cobweb colliding evolutionary design system was constructed and the design of female scooter was taken as an example to verify the feasibility of the method. A new method of product form design was proposed by simulating and applying cognitive thinking and cobweb structure. The behavior and mode of spiders constructing webs and prey colliding on the webs can reasonably simulate the cognitive matching process between designers and users. The method has certain reference value and significance for improving the efficiency of product form design and creating new form design methods.

KEY WORDS: cognitive thinking; cobweb structure; product form; innovative design

收稿日期：2020-09-10
基金项目：国家自然科学基金资助项目（51705226）
作者简介：苏建宁（1974—），男，甘肃人，博士，兰州理工大学教授、博士生导师，主要从事感性工学、智能化设计理论及方法、人机工程等方面的研究。

产品形态是表达产品设计思想和实现产品功能的语言和媒介，能够传递精神、文化等层面的象征性意义。它是产品自身的功能、结构、材料及工艺技术等客观因素与设计师和用户在审美认知、价值判断等主观因素相互作用的综合结果[1]。产品形态创新是企业在激烈的市场竞争中谋求生存和发展的重要方法[2]。

随着企业生产模式的转型，个性化定制模式的普遍应用强化了产品设计中用户驱动的属性，面向用户的个性化需求开展设计实践活动已逐渐成为行业共识[3]。然而，传统产品形态设计大多由设计师主导和执行，遵循固定流程下的设计方法，用户参与程度比较有限。设计结果依赖于设计师的感性思维和经验累积，与用户需求存在一定偏差[4]，不能很好地实现设计师和用户的认知匹配，获得个性化程度较高的产品。

在探讨设计思维和认知过程的基础上，应用蛛网结构建立设计师和用户的认知平衡模型，提出一种基于认知思维和蛛网结构的产品形态创新设计方法。该方法支持用户协同设计师共同发掘创意产品形态，有利于产品形态方案的直接生成和个性选择，可增强用户的产品体验感和满意度。

1　认知思维

创新是新颖、独特的智力思维，是一种以新的方式看待问题或情景的认知活动[5]。设计是人类典型的高级智力活动，具有独特的视觉推理和创新性特征，设计认知是指设计活动中，信息输入、简化、细化、存储、恢复和利用所依赖的思维加工过程[6]。设计创新活动可被看作概念、问题、要求等要素之间，通过推理、因果、类比等联系建立网络的过程。从认知的角度来看，设计创新活动与蜘蛛建网行为具有一定的相似性，设计方案是设计思维过程的可视化结果，蛛网结构可用于描述设计思维过程和表征设计方案。

设计的核心主体是设计师和用户，近年来多位学者对设计过程中设计师和用户的认知活动进行了研究，取得了一定的成果。罗仕鉴等人[7]研究了设计师和用户在感知产品造型上的共同点及差异，建立了设计师与用户之间的感知意象匹配模型；谭征宇等人[8]分别研究了设计师和用户的感知模式，从交互设计的角度建立了设计师和用户的感知关系模型；赵丹华等人[9]以设计师和用户为研究对象，对其意象认知进行数理表达，构建了汽车造型意象认知模型；万延见等人[10]基于认知思维提炼了多参与者协同创新的一般性流程，建立了一种多方法集成的协同创新设计框架；Yilmaz 等人[11]研究了设计师和工程师在设计问题求解过程中的认知策略和概念生成方法，通过实验证明了设计启发法对创新的增强作用；Yao 等人[12]分析了设计者和用户的语义认知差异，构建了用户认知概念与产品形态要素之间的映射模型，辅助设计人员更理性地进行产品形态设计。

综上，在设计开发过程中，设计师和用户的感知信息具有不对称性，形成了一定的认知差异，建立设计师和用户的认知平衡模型可提高设计效率，促成设计方案与预期目标的匹配。目前，相关研究大多侧重于对现有产品形态的评价和反馈，以及根据设计参与者的认知特性进行产品方案设计或选择较少研究能以过程简明、结果直观的创新设计方法实现产品形态生成。因此，本研究仿照蜘蛛建网、猎物撞击的模式，建立设计师和用户的认知平衡蛛网模型，建构蛛网撞击进化设计系统，生成创意形态方案。

2　蛛网结构

蜘蛛利用蜘蛛网捕捉猎物，在阻拦猎物过程中蛛丝发生弹性形变，蛛网结构主要依靠经线来吸收猎物撞击蛛网带来的巨大动能[13]。在绝大部分蛛网中，经线由高强度和高韧性的牵引丝构成，保证网不被轻易冲破；而纬线则由柔顺易延展的粘丝构成，用于缠绕和容纳猎物[14]。两种丝线共同作用将蛛网的捕猎功能发挥至最大。

蛛网结构具有易于理解、信息表征形象等特点[15]，已在不同学科中得到应用。Contreras 等人[16]提出了竞争性电力市场的蛛网招标模型，电力公司根据剩余需求的迭代曲线制定出价策略，实现了收益最大化；Knyazeva[17]基于主动认知理论，将认知主体与客体之间、个体思维与集体思维之间建立的非线性网络式链接隐喻地称为非线性认知蛛网；钟郁楠[18]仿照蜘蛛在蜘蛛网上快速抓捕猎物的行为，提出了一种改进遗传算法以增强传统遗传算法对搜索空间变化的适应能力；张书涛等人[19]使用仿生蛛网结构建立了产品意象蛛网模型，借助遗传算法实现了产品意象蛛网的进化，模拟了设计思维在产品进化中的变化规律；Yang 等人[20]通过研究品牌产品与产品形态基因之间的关系建立了品牌产品蛛网，结合蜜蜂进化型遗传算法提出了一种面向品牌产品的多维风格形态智能设计方法。

目前，相关研究大多借助蛛网结构快速建立网络来描述网络内部各要素之间的联系，而借鉴蛛网受力发生形变特点进行相关应用的研究较少，设计领域主要将蛛网结构用于品牌系列产品方案的表征。本研究将蛛网结构用于表征产品形态方案，借鉴其受力形变的特性建构蛛网撞击进化设计系统。

3　研究流程

研究流程包括三个步骤：（1）建立产品方案表征蛛网；（2）用户语义提取分析与形态转化；（3）建构蛛网撞击进化设计系统。研究流程见图 1。

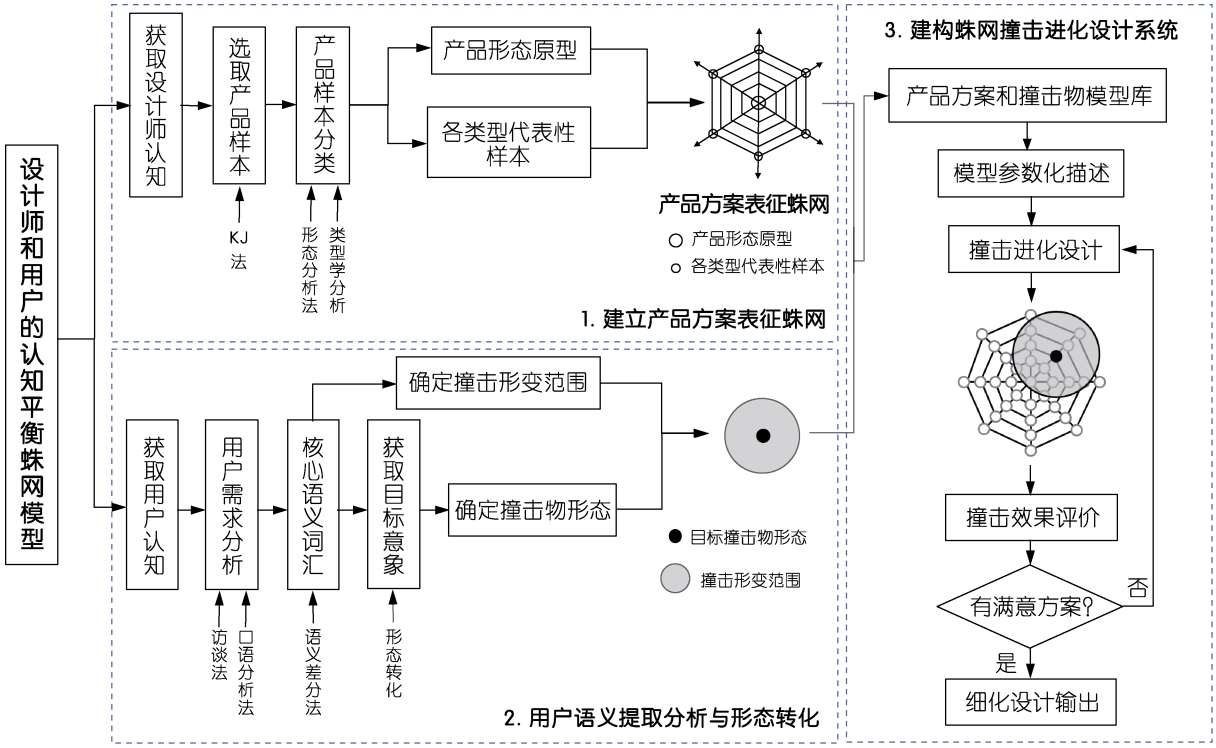

图 1 研究流程

Fig.1 Research flow chart

3.1 建立产品方案表征蛛网

设计原型是满足用户需求的最基本的产品形态，是设计师与用户共同的形态认知基础[21]。类型是指具有某一特征或属性的事物构成的集合[22]。Aldo Rossi 认为原型是构成事物的基本形式，类型是原型背后的形式变化原理和逻辑规则，追溯类型的发展历程有助于确定事物的原型[23]。通过提炼某类产品的共识性特征得到设计原型，参考不同类型产品的形态构成法则，有意识地对设计原型进行变形可生成创新方案。

根据上述方法建立产品方案表征蛛网。首先确定研究对象，由设计师收集产品样本，运用 KJ 法、形态分析法、类型学分析方法划分样本类型；然后提炼目标产品原型，确定各类型代表性产品样本；最后对产品原型和代表性产品样本进行网格建模，使用蛛网模型对上述初始形态方案进行表征。其中，蛛网中心对应设计原型，由中心向外扩散的经线对应产品形态方案类型，网面末端节点对应各类型代表性产品样本。以网格变形的方式实现产品原型和代表性产品样本的形状融合，蛛丝经线和纬线交汇的节点对应中间形态方案。产品方案表征蛛网见图 2。

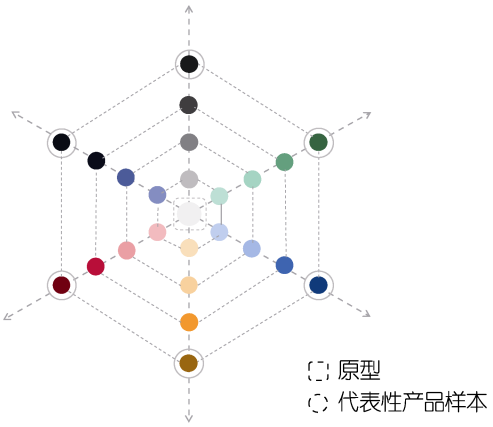

图 2 产品方案表征蛛网

Fig.2 Product schemes characterizing cobweb

3.2 用户语义提取分析与形态转化

用户语义提取一般包括用户语义采集、文本整理和语义词汇提炼三个步骤[24]。首先采用访谈法、口语分析法获取用户语义；然后对原始语义描述文本进行规范化处理，将自然语言信息转化为适用于研究分析的词汇形式；最后对语义词汇进行概括、提炼和润色，获取用户关注度较高且具有良好语义表达能力和积极设计价值的核心语义词汇。核心语义词汇主要包括形容词、形容词性短语和程度副词，其中形容词和形容词性短语能够反映用户主观层面的情感意象[25]，获取用户目标意象并对其进行形态转化有助于寻找恰当的设计契合点进行后续设计。

形态转化过程主要受用户审美、爱好、教育、文化、生活习惯等因素的影响。通过对用户目标意象进行审美逻辑上的形态关联，分析确定出目标撞击物形态。运用语义差分法（Semantic Differential Method，SDM）量化用户情感，对程度副词进行分级，根据用户期望的强烈程度，确定后续进化设计中撞击点处的产品形态方案形变范围。

3.3　建构蛛网撞击进化设计系统

基于 Rhinoceros 软件平台，使用 Grasshopper 可视化编程语言建构蛛网撞击进化设计系统，核心步骤是确定进化方式和制定撞击规则。

1）进化方式。形态融合（Shape Blending）又称形状渐变或变形。形态融合技术可在保留原始物体形状特征的基础上，实现源形态和目标形态之间的自然过渡[26]。在获取符合设计师认知的产品方案表征蛛网和符合用户认知的目标撞击物形态后，使用四边形网格描述产品形态，运用形状融合技术实现产品形态方案的进化设计，输出一系列的三维融合形态方案。该技术的关键要求是被插值网格具有完全相同的拓扑关系。

2）撞击规则。假设撞击点均为蛛网经线和纬线的交点，以撞击点处形态方案受到撞击后产生的最大形变量为上限建立形状融合的插值区间。以撞击点为圆心，撞击点和蛛网中心之间的连线为半径画圆界定撞击影响范围，该范围内的所有产品方案模型与撞击点间距和形状融合的中间插值呈负线性相关关系。撞击进化设计蛛网模型见图 3。

蛛网撞击进化设计系统作为一种交互式形态进化设计工具，首先用户对产品方案表征蛛网中的设计原型进行选择，确定待撞击进化形态方案；然后将待撞击进化形态方案放置于蛛网各个节点，建立撞击进化设计蛛网模型；再由设计师提取符合用户目标意象的撞击物形态，在用户确定撞击点后由系统计算撞击影响范围，完成撞击进化设计；最后用户选择和评估系统生成的创意设计方案，并由设计师细化完善，输出设计结果。

4　实例研究

滑板车是一种都市轻型代步交通工具，具有轻巧便携、易于操控的特点[27]，如今越来越受到女性用户的关注和青睐。面向女性用户的滑板车设计既要实现基本的代步功能，又要迎合女性群体的感性偏好。以女性滑板车形态设计为实例，建立滑板车方案表征蛛网和支持用户参与的蛛网撞击进化设计系统，协同设计师生成创意方案。

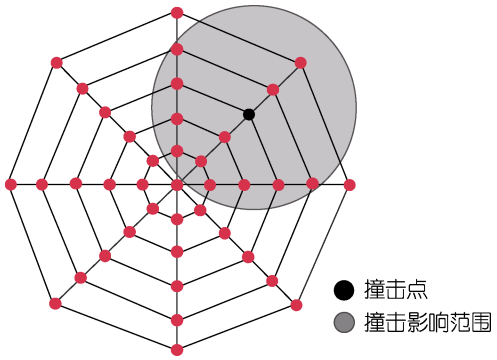

图 3　撞击进化设计蛛网模型

Fig.3　Colliding evolutionary design cobweb model

4.1　建立滑板车方案表征蛛网

1）建立滑板车样本库。初步收集滑板车样本七十份，经筛选确定最终的滑板车实验样本五十份。为避免形态以外因素对被试者造成干扰而影响实验结果，对产品样本图片进行如下处理：统一图片中滑板车的大小、位置和朝向；将滑板车主体放置在白色背景上；将样本图片处理成灰阶图；去除品牌标识和杂乱光影；将样本图片依次编号为 1~50，滑板车样本库见图 4。

2）划分滑板车形态类别。滑板车由手把、转向杆、前叉、踏板、车轮、支架，前灯、尾灯、喇叭、脚撑等部件组成，其中支架线条轮廓、前叉位置和踏板形状对滑板车的形态影响比较明显，以这三个部件为主进行形态学分析。支架可分为直形圆管、弯形圆管、Y 形圆管和有机形管四种；前叉按照连接位置可分为低位置和高位置两种；踏板形状可分为平面圆角矩形、下凹曲面弧形、起伏曲面有机形三种。结合类型学分析方法，将滑板车样本分为六类，各类型代表性样本见图 5。

3）形成滑板车方案表征蛛网。从滑板车样本中提炼设计原型，统一各类型代表性样本的拓扑结构。运用 TSplines 插件对设计原型和代表性样本进行网格建模，设计原型和代表性样本模型见图 6。使用蛛网结构表征滑板车方案，设计原型被放置于蛛网中心，六条由中心向外扩散的经线对应六个滑板车样本类型，在网面末端节点位置放置代表性样本模型，蛛丝经线和纬线交汇的节点对应中间形态方案。滑板车方案表征蛛网见图 7。

4.2　用户语义提取分析与形态转化

选择具有滑板车使用经验的十位女性用户作为被试者进行一对一的访谈调研。结合口语分析法获取女性用户对滑板车的评价和看法、购买关注点和设计期望等内容，确定女性滑板车的设计定位。

1）构建形容词对。整理由访谈获取的文本，规范化处理文本内容，初步筛选后得到二十四个独立词汇。综合考虑词汇出现次频、表达蕴意、描述对象等因素，概括提炼出八组词义相对的形容词对：“繁复的—简约的”、“成熟的—可爱的”、“复古的—科技的”、“稳重的—动感的”、“质朴的—优雅的”、“传统的—时尚的”、“小巧的—大气的”、“柔和的—硬朗的”。

2）确定意象词汇。为获取女性用户对滑板车的感知意象评价，运用语义差分法在八组词义相对的形容词对之间建立五级 Likert 量表，以六类滑板车代表性样本为评价对象制作调查问卷。要求十位被试者对六类滑板车代表性样本进行感性评价打分，根据问卷调查结果，使用 SPSS 软件对八组形容词对进行 K-Means 聚类分析，感性意象形容词对聚类结果见表

1。根据聚类分析，结合女性用户的喜好度相关性分析，最终以“优雅的”、“动感的”、“柔和的”为目标意象，确定撞击物形态。

3）广泛收集与目标意象相关的形态，通过审美逻辑上的形态关联分析完成目标意象的形态转化。形态仿生设计方法常被用于各种交通工具的外形设计，自然界的生物形态引入更容易引起用户的情感共鸣[28]。天鹅被视作优雅高贵的象征，身体线条优美流畅，高高昂起的头颈曲线感十足，整体形态具有很强的优雅感和柔和感；鲸鱼尾鳍是重要的鲸鱼形态识别特征，尾部形态极富动感。因此，在滑板车形态设计中借鉴天鹅和鲸鱼尾部的形态，将其应用于踏板造型和支架线条，以及后续的撞击进化设计，比较符合女性用户的目标意象和审美感受，目标撞击物形态见图 8。

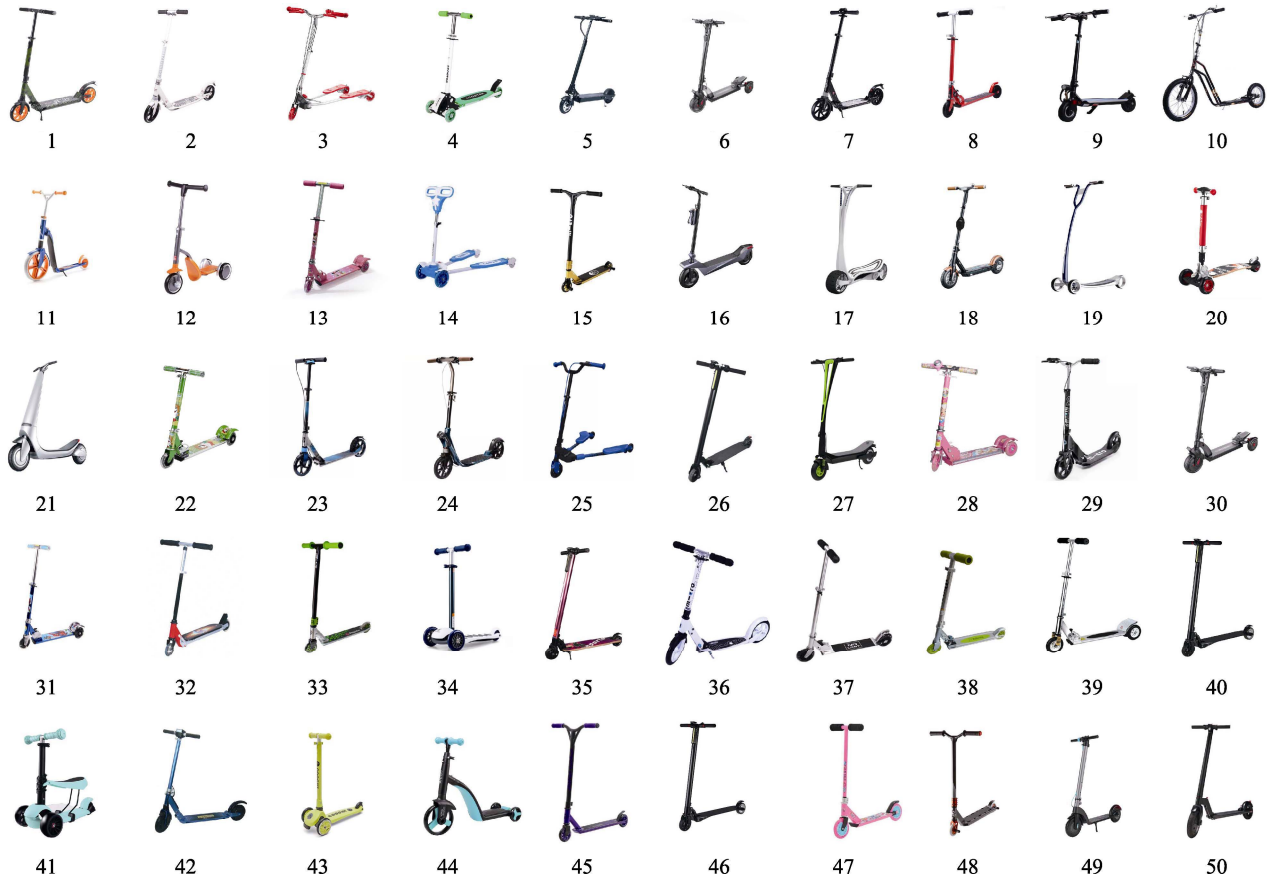

图 4 滑板车样本库

Fig.4 Scooter samples library

图 5 各类型代表性样本

Fig.5 Representative samples of various types

图 6 设计原型和代表性样本模型

Fig.6 Design prototype and models of representative samples

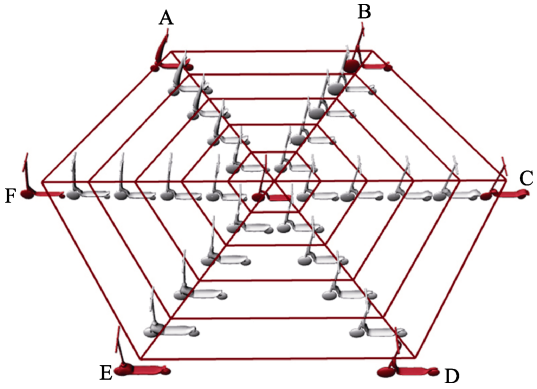

图 7　滑板车方案表征蛛网
Fig.7　Scooter schemes cobweb model

表 1　感性意象形容词对聚类结果
Tab.1　Clustering result of perceptual image adjectives

第 1 类	第 2 类	第 3 类
繁复的—简约的	成熟的—可爱的	柔和的—硬朗的
复古的—科技的	稳重的—动感的	
质朴的—优雅的		
传统的—时尚的		
小巧的—大气的		

4.3　撞击进化设计

蛛网撞击进化设计系统主要包含三个模块。蛛网撞击进化设计系统界面见图 9。

1）表征蛛网模块。用户在进入系统后，首先从产品方案表征蛛网上选取某一原型形态，然后通过调节经线条数、纬线条数和网面大小三个参数建立撞击进化设计蛛网模型。

图 8　目标撞击物形态
Fig.8　Forms of target impactors

2）撞击影响范围计算模块。撞击点的位置由一个小球模型表示，系统默认撞击位置为蛛网经线和纬线交汇的节点。系统按照撞击规则计算撞击影响范围，进而确定蛛网各节点位置的产品形态方案受撞击影响产生的形变量。

3）撞击进化模块。蛛网上的原型形态方案受到撞击影响而发生变形，从而形成反映用户目标意象的撞击物形态的视觉特征。撞击进化过程中产生的中间形态均以三维模型的形式呈现，便于用户观察产品细节和选择方案。撞击进化完成后由用户选取某一产品形态方案，导出的该方案的三维模型由设计师进行方案完善，输出最终设计结果。

将用户从滑板车方案表征蛛网中选取的某一原型形态作为撞击进化设计的源形态，并将其放置在表征蛛网的经纬线交汇节点，建立滑板车撞击进化设计蛛网模型。将女性用户目标意象转化的“天鹅”和“鲸尾”撞击物形态依次撞击蛛网，实现撞击进化。使用小球模型和箭头标记撞击点位置，撞击影响范围内的滑板车形态方案将处于红色状态。用户从撞击进化结果中选取合适的滑板车形态方案，在设计师对该方案

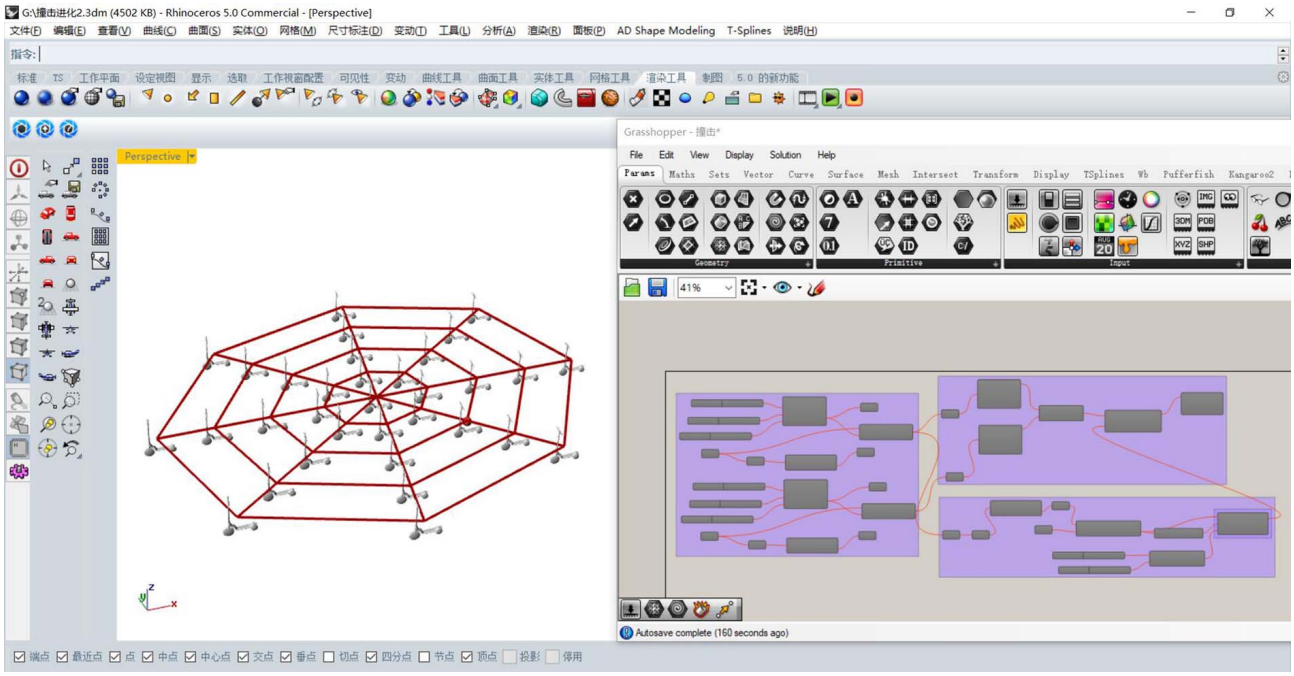

图 9　蛛网撞击进化设计系统界面
Fig.9　Interface of cobweb colliding evolutionary design system

进行细化完善后输出最终设计结果。撞击进化设计过程见图 10，滑板车设计结果见图 11。

4.4 设计方案评价

设计完成后，采用问卷调查法，邀请五位设计师、五位潜在滑板车女性用户对该方案进行评分。调查结果显示，设计产生的滑板车能较好地满足设计要求，滑板车形态与目标意象评价呈正相关，设计师和用户对这款滑板车形态认知趋于一致，证明该方法是合理可行的。

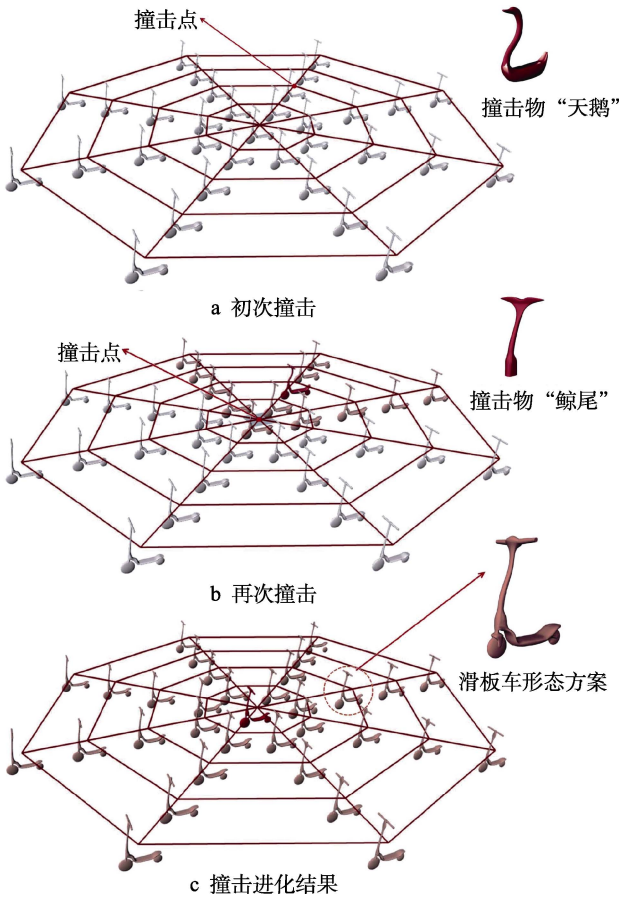

图 10 撞击进化设计过程

Fig.10 Process of colliding evolutionary design

图 11 滑板车设计结果

Fig.11 Result of scooter design

5 结语

为实现产品形态方案与用户意象认知的匹配，提出了一种基于认知思维和蛛网结构的产品形态创新设计方法。从认知思维的角度出发，仿照蜘蛛建网、猎物撞击的模式，建立了设计师和用户的认知平衡蛛网模型。设计师建立产品方案表征蛛网，提取用户目标意象并转化为撞击物形态，建构蛛网撞击进化设计系统以辅助用户参与设计进程，实现了产品形态设计的快速生成和直观评价，结合实例验证了该方法的可行性。研究结果表明，该方法能够有效减小设计师和用户的认知差异，提高设计效率，较快获得符合用户期望的产品创意形态方案，预期将在产品仿生设计、系列化设计中得到良好应用。

参考文献：

[1] SU J N, JIANG P Y, LI H Q. Research on Kansei Image-driven Method of Product Styling Design[J]. International Journal of Product Development, 2009, 7(1/2): 113-126.

[2] 潘萍，杨随先. 产品形态创新设计及其评价体系研究现状与趋势[J]. 机械设计, 2012, 29(5): 1-5.
PAN Ping, YANG Sui-xian. Research Status and Tendency of Product Form Innovative Design and Its Evaluation System[J]. Journal of Machine Design, 2012, 29(5): 1-5.

[3] 李翔，龙慧敏. 面向个性化定制的工业设计方法研究[J]. 艺术与设计(理论), 2018, 2(8): 94-96.
LI Xiang, LONG Hui-min. Individual Customization Oriented Industrial Design Method Research[J]. Art and Design, 2018, 2(8): 94-96.

[4] 吴俭涛，袁放，孙利. 基于象元运算的轮毂形态设计方法研究[J]. 包装工程, 2018, 39(24): 163-171.
WU Jian-tao, YUAN Fang, SUN Li. Method of Wheel Form Design Based on Operation of Meta Symbol[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(24): 163-171.

[5] SOLSO R L, MACLIN M, MACLIN O H. 认知心理学[M]. 第 7 版. 邵志芳，李林，译. 上海：上海人民出版社, 2008.
SOLSO R L, MACLIN M, MACLIN O H. Cognitive Psychology[M]. The Seventh Edition. SHAO Zhi-fang, LI Lin, Translate. Shanghai: Shanghai People’s Publishing House, 2008.

[6] 刘征，鲁娜，吴剑锋. 基于设计认知的草图研究综述[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(12): 2376-2382.
LIU Zheng, LU Na, WU Jian-feng. Review of Sketch Based on Design Cognition[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science Edition), 2010, 44(12): 2376-2382.

[7] 罗仕鉴，朱上上. 用户和设计师的产品造型感知意象[J]. 机械工程学报, 2005, 41(10): 28-34.
LUO Shi-jian, ZHU Shang-shang. Users' and Designers' Product Form Perceptual Image[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(10): 28-34.

[8] 谭征宇，刘磊，江阳晨. 交互设计中基于感知冲突的行为风格研究[J]. 包装工程, 2019, 40(6): 165-172.
TAN Zheng-yu, LIU Lei, JIANG Yang-chen. Behavior Style Based on Cognitive Conflict during Interaction Design[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(6): 165-172.

[9] 赵丹华，景春晖. 基于设计师—用户意象认知模型的汽车造型可信性评价方法[J]. 包装工程, 2015, 36(12): 78-82.
ZHAO Dan-hua, JING Chun-hui. The Credibility Evaluation Methods of Vehicle Modeling Based on the Designer-User Image Cognition Model[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(12): 78-82.

[10] 万延见，李彦，熊艳，等. 基于创新认知思维过程多参与者协同创新设计研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(6):176-183.
WAN Yan-jian, LI Yan, XIONG Yan, et al. Multiparticipant Collaborative Innovative Design Based on Creative Cognitive Thinking Process[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2013, 45(6): 176-183.

[11] YILMAZ S, DALY S R, SEIFERT C M, et al. A Comparison of Cognitive Heuristics Use between Engineers and Industrial Designers[C]. Dordrecht: Springer Press, 2011.

[12] YAO Y, HUANG Y Q. Mapping Model between Users' Cognitive Concept and Product Shape Information[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 32 (7): 4051-4054.

[13] SENSENIG A T, LORENTZ K A, KELLY S P, et al. Spider Orb Webs Rely on Radial Threads to Absorb Prey Kinetic Energy[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2012, 9(73): 1880-1891.

[14] 于晖，杨嘉陵，刘华. 基于有限元方法的蜘蛛网阻拦猎物过程模拟[J]. 北京航空航天大学学报，2016, 42(2): 280-286.
YU Hui, YANG Jia-ling, LIU Hua. Simulation of Prey Stopping Process by Spider Webs Based on Finite Element Method[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(2): 280-286.

[15] DAS R, KUMAR A, PATEL A, et al. Biomechanical Characterization of Spider Webs[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2017(67): 101-109.

[16] CONTRERAS J, CANDILES O, FUENTE J I D L, et al. A Cobweb Bidding Model for Competitive Electricity Markets[J]. IEEE Power Engineering Review, 2002, 17(1): 148-153.

[17] KNYAZEVA H. The Cognitive Architecture of Embodied Mind[J]. International Journal of the Humanities, 2011, 8(12): 1-10.

[18] 钟郁楠. 基于蛛网结构的改进遗传算法研究[J]. 计算机与现代化, 2011, 42(1): 42-44.
ZHONG Yu-nan. An Improved Genetic Algorithm Based on Structure of Cobweb[J]. Computer and Modernization, 2011, 42(1): 42-44.

[19] 张书涛，肖丽薇，苏建宁，等. 基于蛛网结构的产品意象进化算法研究[J]. 现代制造工程，2018，40(11): 7-13.
ZHANG Shu-tao, XIAO Li-wei, SU Jian-ning, et al. Product Image Evolutionary Algorithm Based on the Structure of Cobweb[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2018, 40(11): 7-13.

[20] YANG W J, SU J N, ZHANG S T, et al. Intelligent Design of the Multi-dimensional Style Form of a Product under a Brand Cobweb Constraint[J]. International Journal of Arts and Technology, 2021.

[21] 张中义，王家民，吉晓民，等. 基于认知原型的形态衍生方法[J]. 包装工程, 2017, 38(12): 78-82.
ZHANG Zhong-yi, WANG Jia-min, JI Xiao-min, et al. Derivative Method of Form with Cognitive Prototype[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(12): 78-82.

[22] 景楠，方海，张秦玮. 基于类型学的产品风格创新设计研究[J]. 机械设计, 2015, 32(4): 131-135.
JING Nan, FANG Hai, ZHANG Qin-wei. Product Style Innovative Design Based on Typology[J]. Journal of Machine Design, 2015, 32(4): 131-135.

[23] 韩抒言，王怡然. 阿尔多·罗西的建筑类型学的范畴与应用探讨[J]. 城市建筑, 2016(21): 210-211.
HAN Shu-yan, WANG Yi-ran. Category and Application of Aldo Rossi's Architectural Typology[J]. Urbanism and Architecture, 2016(21): 210-211.

[24] 李然，支锦亦，肖江浩，等. 产品语义提取方法及流程研究[J]. 包装工程, 2018, 39(22): 132-137.
LI Ran, ZHI Jin-yi, XIAO Jiang-hao, et al. Product Semantic Extraction Method and Procedure[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(22): 132-137.

[25] 梁峭. 汽车造型要素与用户情感意象关联研究[J]. 包装工程, 2016, 37(20): 14-19.
LIANG Qiao. Correlation between Car Styling Elements and User Emotional Image[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(20): 14-19.

[26] YANG W W, FENG J Q. 2D Shape Morphing Via Automatic Feature Matching and Hierarchical Interpolation [J]. Computers & Graphics, 2009, 33(3): 414-423.

[27] 龚纯，胡伟峰，梁峭，等. 基于 iNPD 的电动滑板车开发设计[J]. 设计, 2017(14): 114-115.
GONG Chun, HU Wei-feng, LIANG Qiao, et al. Development and Design of Electric Scooter Based on INPD [J]. Design, 2017(14): 114-115.

[28] 罗仕鉴，张宇飞，边泽，等. 产品外形仿生设计研究现状与进展[J]. 机械工程学报, 2018, 54(21): 138-155.
LUO Shi-jian, ZHANG Yu-fei, BIAN Ze, et al. Status and Progress of Product Shape Bionic Design[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(21): 138-155.