

# 基于形态审美的产品基因网络造型研究

姜鑫玉, 刘镇铭, 周丰, 王涛, 潘侯羽, 王心仪

( 东华大学 机械工程学院, 上海 201620 )

**摘要:** **目的** 利用产品形态审美基因网络, 对台灯外轮廓曲线的相关性进行综合分析, 析出产品优化与创新设计的关键要素。**方法** 以三次贝塞尔曲线对台灯的外轮廓曲线进行基因编码, 规律性调整控制点的坐标生成新曲线形态, 进行曲线视觉力感知识别, 挖掘曲线间的相关性; 以曲线基因为节点, 相关性为边构建产品形态审美基因网络, 并对网络进行拓扑分析, 析出关键设计节点辅助设计者进行产品设计。**结果** 运用产品形态基因网络的理论找到原型设计的关键性节点, 并进行设计优化, 使产品造型设计更符合消费者的审美习惯和偏好。**结论** 通过对台灯外轮廓线的案例实践, 证实了产品形态基因网络在产品细节优化和造型创新设计方面具有实用性和可靠性, 能够辅助设计者找到关键设计节点并协调设计的基因集团。

**关键词:** 产品造型视觉力; 三次贝塞尔曲线; 曲线形态; 产品形态基因网络; 设计优化

**中图分类号:** TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)20-0092-10

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.20.010

## Product Gene Network Modeling Based on Form Aesthetics

JIANG Xin-yu, LIU Zhen-ming, ZHOU Feng, WANG Tao, PAN Hou-yu, WANG Xin-yi

(College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

**ABSTRACT:** By using the aesthetic gene network of product form, the paper aims to comprehensively analyze the correlation of exterior contour curve of desk lamp, and identify the key elements of product optimization or innovative design. The cubic Bezier curve is used to encode the exterior profile curve of the lamp, and the coordinates of the control points are adjusted regularly to generate a new curve shape. The visual perception of the curve is carried out to identify the correlation between the curves; Taking the curve gene as the node and the correlation as the edge, the aesthetic gene network of product form is constructed, the topology of the network is analyzed, and the key design knowledge is extracted to assist the designer in product design. Using the theory of product form gene network to find the key nodes of prototype design, the design is optimized to make the product modeling design more in line with the aesthetic habits and preferences of consumers. Through the case study of table lamp contour, it is proved that the product form gene network is practical and reliable in product detail optimization and innovative design, and can help designers find key design nodes and coordinate the design of the gene group.

**KEY WORDS:** product modeling visual power; cubic Bezier curve; curve shape; product form gene network; design optimization

科技发展给予产品设计发展空间, 产品功能逐渐丰富, 造型设计灵活。如今年轻用户不仅追求产品使

用功能的多样性, 也同样重视产品外观所带来的视觉审美体验。个性化、情感化、时尚感等具有视觉冲击

收稿日期: 2022-05-22

基金项目: 上海市教委教育科学基金资助项目 ( C2-2020047 ); 东华大学人文社科繁荣计划资助项目

作者简介: 姜鑫玉 ( 1981— ), 女, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为产品与信息服务设计、设计认知与计算机深度学习等。

通信作者: 周丰 ( 1972— ), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为知识科学为背景的设计学研究。

的产品造型更能吸引消费者的关注,并逐渐成为市场的竞争优势。产品造型是用户视觉感知的第一步,产品形态各元素之间相互作用形成的视觉张力直接刺激用户的神经感知<sup>[1]</sup>。本研究在先前的研究基础上,对造型美学表达进行深入研究,运用贝塞尔曲线变换及基因网络的形式,客观地展现曲线形态变化的视觉感知临界点,以及产品造型元素的相互影响关系,为设计者提供更加客观的设计依据。

## 1 研究背景

鲁道夫·阿恩海姆<sup>[2]</sup>认为,艺术品客观上静止不动,不存在物理力的驱动和物理动作形成的幻觉,但是视觉却能够真实地感知出其“不动之动”。视觉力的形成与大脑的认知经验有关,大脑中的力场对来自外在或者自身的刺激物呈现为一种生理力、心理力<sup>[3]</sup>。视觉动力学理论认为艺术形式的美学特性存在“力场”,由于这种心理力的存在,消费者的心理认知与外部世界产生了“异质同构”的联系,当两者的“力”结构一致时,消费者对产品形成情绪感知<sup>[4]</sup>。工业产品设计中,造型的视觉力不是凭空产生的,在设计之前就存在一个先天的形态<sup>[5]</sup>,对基础形态的平衡状态进行变换,通过造型曲线的弯折、延长、倾斜等手段表达产品整体造型视觉力的削弱、增强、转向等。

轮廓线是产品形态的重要特征之一,决定了产品各部分曲面的走势及整体姿态的变化,轮廓信息与图像的其他特征相比,携带稳定的信息,一定程度上代表了产品的结构<sup>[6-7]</sup>。产品轮廓线之间的关系搭建了产品的基本空间结构,因为面的形态通常是由线控制,线自身的形变(弯折或者延伸)、线与线之间的空间关系(平行或者相交),线与线间的距离关系等生成不同的曲面造型,是产品在三维空间的表达基础。造型轮廓线是物体形态的简化表达,将不必要的细节进行模糊处理,概括性地描述产品整体特征。在产品造型设计中,线包含了产品形态完整的信息量<sup>[8]</sup>,在视觉上,产品造型的走势、比例等由曲线控制,曲线携带着产品造型所要传递的隐形信息,如倾斜角度、延伸方向、曲线间的视觉关系等。

Tang 等<sup>[9]</sup>将线条、尺寸和比率等设计参数引入设计模型,采用超椭圆拟合技术描述产品轮廓,并开发出系统性纳入用户感知的产品造型设计计算技术。Chen<sup>[10]</sup>针对泛族群产品的语义感知建立了基于情感语义的泛族群产品形式基因聚类方法,以产品造型基因提取和编码的形式获得用户对泛族群产品的感知图像。Fan 等<sup>[11]</sup>通过数字定义的形状表示系统性检查汽车的造型特征,使用支持向量回归模型选取形容词预测消费者的情感反应。Dogan 等<sup>[12]</sup>提出以三次贝塞尔曲线定于设计特征,在约束条件内调整每个线段的控制点位置生成新样本,推导出现有产品新的设计空

间。罗仕鉴等<sup>[13]</sup>提出消费者偏好驱动的运动型多用途汽车产品族侧面外形基因设计方法,建立消费者偏好与产品族外形基因之间的映射模型,运用遗传算法实现偏好驱动的 SUV 产品族侧面轮廓线基因进化。张文召等<sup>[14]</sup>提出一种多目标驱动的产品形态基因网络模型,以品牌形象、用户偏好、社会情境为驱动目标,分析产品形态基因节点与边的设计,构建 M-FGN 网络提高产品意象传达的准确度。

## 2 产品形态基因网络研究方法

### 2.1 三次贝塞尔曲线

三次 Bezier 曲线具有逼近程度高、适应性强、计算简便且便于控制的特点,在产品轮廓描述方面具有数学计算简便且操作简单的优势,在产品设计中广泛应用。三次 Bezier 曲线的控制点位置决定了曲线的形态特征,通过调整控制点的位置,可以对曲线进行局部或整体形态的改变<sup>[15]</sup>,从而生成符合设计要求的曲线形式。

给定平面内点  $S_i$  ( $i=0,1,2,3$ ), 对于  $t \in [0,1]$ , 三次 Bezier 曲线可用数学函数进行描述:

$$P(t) = P(t, \lambda, \mu) = \sum_{i=0}^3 V_i b_{i,3}(t) \quad (1)$$

其中  $V_i$  是曲线的控制顶点, 多项式

$$\begin{aligned} b_{0,3}(t) &= [1-(\lambda-2)t](1-t)^2 \\ b_{1,3}(t) &= \lambda t(1-t)^2 \\ b_{2,3}(t) &= \mu t^2(1-t) \\ b_{3,3}(t) &= [3-\mu+(\mu-2)t]t^2 \end{aligned} \quad (2)$$

为三次 Bezier 曲线的多项式基函数,形状参数  $\lambda$  和  $\mu$  满足  $0 < \lambda, \mu \leq 3$ 。通过控制点和形状参数相结合的调整能够更好地控制造型整体和局部的形态,在原型的基础上生成丰富的形态曲线。

### 2.2 曲线变换规则

三次贝塞尔曲线是一段流畅平滑的圆弧曲线,通常使用 4 个控制点进行描述,见图 1a。控制点位置的变化引导了曲线形态的变化,控制点的位置用平面直角坐标系进行表示,在数学逻辑上,点的位置的改变在直角坐标系中用  $x, y$  方向上的坐标平移进行表示,  $a = (x, y) \rightarrow a' = (x', y')$ , 其中  $x' = x + \Delta x, y' = y + \Delta y$ 。由于在产品设计中,曲线不是单独存在而是与其他曲线连接构成具有形态特征的图形,因此,曲线在变换的过程中要求曲线之间的连续性不变,那么曲线端点的控制点坐标不变,非端点的控制点进行变换。由于三次贝塞尔曲线的特殊性,转化为位于同一直线的控制点绕端点旋转,或点在连线上移动,见图 1b。

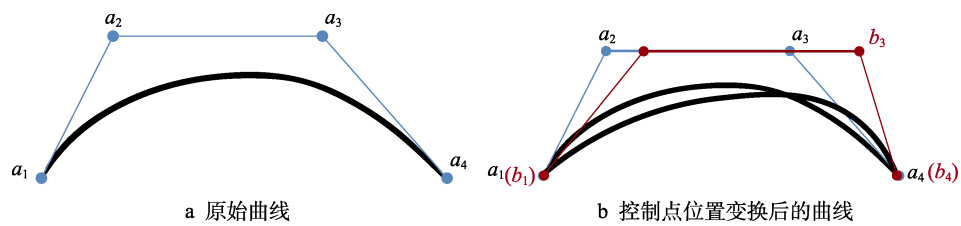


图 1 三次贝塞尔曲线变换规则  
Fig.1 Transformation rules of cubic Bezier curve

基于以上点的变换规则,本研究采用极坐标系表示点的位置,  $a=(\theta,r)$ ,  $r$  为点到原点的距离, 曲线编码的坐标原点为极坐标变化原点,  $\theta$  为控制点和原点连线与水平  $x$  轴的夹角, 有  $a=(\theta,r)\rightarrow a'=(\theta',r')$ , 其中  $\theta'=\theta'+\Delta\theta, r'=r+\Delta r$ 。如图 2 所示,  $a_2=(\theta,r)\rightarrow b_2=(\theta',r')$ 。极坐标的表示方式简化了平面直角坐标的运算程序, 距离和角度的变换增加了点的位置调整

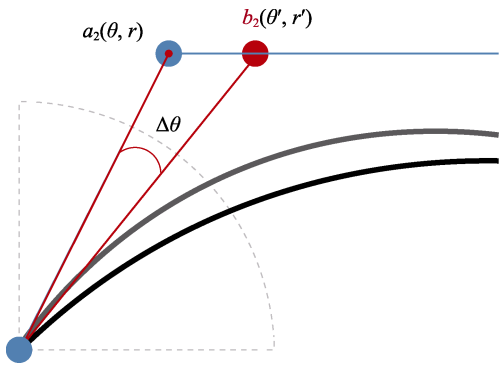


图 2 控制点极坐标表示方法  
Fig.2 Polar coordinate representation of control points

的灵活性。

2.3 产品形态审美基因网络

基因调控网络 (Gene Regulatory Network) 是基因与基因之间的相互作用关系形成的网络形式, 目前主要用于寻找基因之间的协同关系, 从工业设计角度看, 产品基因网络就是帮助设计者找到“哪个设计因素最为关键”“哪些线条的联合作用对整体造型的影响程度最高”“产品造型优化设计的关键节点是哪个”等信息。

产品形态基因网络最主要的工作是析出节点的重要程度, 以及节点间相关性等信息, 围绕基因节点, 通过对节点中心性、敏感程度等的分析, 衡量与其他节点的关系及设计评价的影响度。产品基因网络存在一定的拓扑关系, 节点的度, 节点的敏感性和节点集团是衡量节点效能的三个重要维度<sup>[16]</sup>, 其中, 度是衡量节点与其他节点的互动性, 即该基因节点的连线条数称为它的度, 节点的度越高, 说明该节点与其他节点的互动程度越高, 即该节点为设计的关键节点。产品形态基因网络构建流程见图 3。

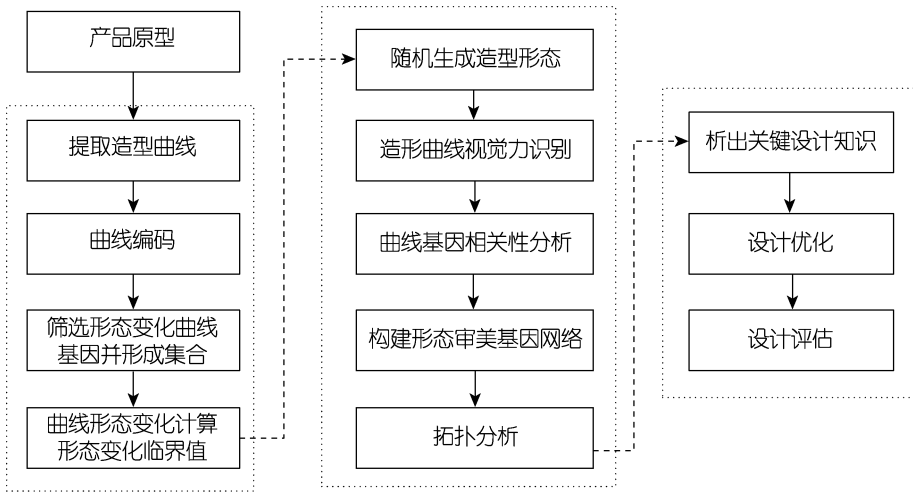


图 3 产品形态基因网络构建流程  
Fig.3 Construction process of product morphological gene network

3 产品基因网络实例研究

3.1 台灯轮廓曲线提取

产品轮廓线是产品两个表面相交形成的一段曲

线, 它决定了产品内部结构的尺寸。在三维软件中, 通过投影可以基本确定一个产品三个视角中的轮廓线。此外在计算机辅助工业设计中, 通常使用贝塞尔曲线定义一条线段的形态, 其中三次贝塞尔曲线是表达连续性点数最少的曲线, 通过两个端点和两个自

由的控制点可以基本确定一条曲线的形态。

本研究在三维软件中,提取已有的数字设计模型草图原型侧面轮廓线(如图 4a 所示),并用三次贝塞尔曲线对轮廓线进行调整优化,将产品轮廓曲线放置二维平面坐标系中,在端点、交点、切点处对曲线进行分割,并进行基因编码。如图 4b 所示,在二维直角坐标系中,对提取的模型轮廓线进行编码,形成曲线基因  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_{13}\}$ ,  $a_i = \{(a_{ix1}, a_{iy1})(a_{ix2}, a_{iy2})(a_{ix3}, a_{iy3})(a_{ix4}, a_{iy4})\}$

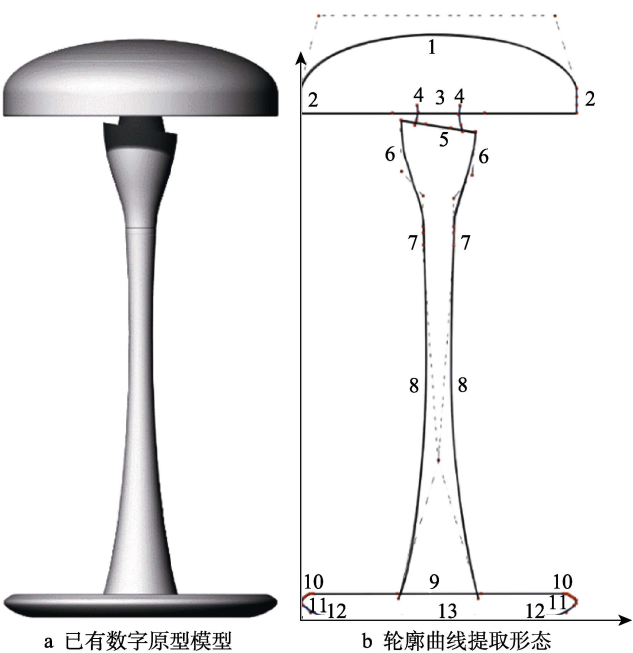


图 4 轮廓曲线编码  
Fig.4 Contour curve coding

在直角坐标系中,标定各曲线控制点的坐标,组成坐标集合。读写作业台灯设计使用漫反射照明,放置于桌面使用,结构方面有确定的尺寸和要求,因此在轮廓线的变换中,结构曲线不进行坐标变化。由于部分产品轮廓曲线是对称的,因此取其一进行视觉力变换,在进行曲线变换时,保持结构曲线形态不变,如曲线 2、曲线 4、曲线 6、曲线 7、曲线 11、曲线 13,六条与

产品结构相关的曲线,不作为产品造型轮廓线进行变换,由此构成变换曲线集合  $Q = \{a_1, a_3, a_5, a_8, a_9, a_{10}, a_{12}\}$ , 各条曲线控制点坐标如表 1 所示。

3.2 轮廓曲线视觉力变换

视觉动力学理论认为,张力来源于形变,轮廓曲线形状发生形变时,增加了产品整体造型视觉表现力。在阿恩海姆关于力的三个层次中,当曲线由于形变产生一种运动倾向或呈现出外力的视觉感受时,则可视为此时的曲线形态表现出一种视觉张力。轮廓曲线视觉力变换通过简单的视觉感知实验,寻找在台灯轮廓曲线基因集合中,产生视觉力的曲线变化临界点。

由于曲线控制点之间关系的特殊性、产品结构的约束等因素,曲线控制点在调整的过程中,需要根据实际情况确定需要调整的控制点个数及方向。为保证调整能够遍历曲线控制点,采取逐条调整的方式,即以端点切割曲线,遍历曲线基因集合逐条进行调整变换。本研究在 MATLAB 环境中运行曲线变换程序,将曲线控制点以极坐标的形式按照  $(\theta \pm 2, r \pm 2)$  的坐标变化规律改变 10 次控制点的位置,其中部分曲线变形极度扭曲,影响整体结构,在本研究结果中进行删除,输出变化曲线,如图 5 所示。

由于曲线控制点变化排列组合可能性较多,曲线可变化控制点数量不一,本研究为了简化变化流程,保证各曲线变化规律一致,每条形态可变的曲线仅改变一个控制点的坐标位置进行曲线形态变化,研究其视觉力的表达临界值。为了便于区分,采用  $[\pm, \pm]$  的形式来表示变换的控制点极坐标递减/递增的变换规律。邀请 50 位用户对曲线形态张力表现进行评价,参与者为平均年龄 24 岁的在校学生,从曲线吸引力、排斥力、膨胀力和扭曲力方面进行视觉冲击评价,在实验过程中要求被试对象选出开始形成视觉张力冲击的曲线形态,并对该曲线的控制点坐标变换值进行标记,统计出选择该曲线的人数。实验获得有效数据 45 份。

在视知觉理论中,空间性的视觉张力包含:吸引力、排斥力、膨胀力、扭曲力、分离力、聚合力等。本文根据曲线自身形态是否受到外力影响,着重讨论吸引力、排斥力、膨胀力与扭曲力。

表 1 变换曲线各控制点坐标  
Tab.1 Coordinates of control points of transformation curve

| 曲线       | 第 1 控制点坐标         | 第 2 控制点坐标         | 第 3 控制点坐标         | 第 4 控制点坐标          |
|----------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| $a_1$    | ( 0, 344 )        | ( 12, 391.28 )    | ( 166, 391.28 )   | ( 180, 344 )       |
| $a_3$    | ( 0, 164 )        | ( 60, 328 )       | ( 120, 328 )      | ( 180, 328 )       |
| $a_5$    | ( 65.5 , 323.46 ) | ( 81.76, 320.94 ) | ( 98.02, 318.40 ) | ( 114.14, 315.88 ) |
| $a_8$    | ( 80, 250 )       | ( 80, 242 )       | ( 90, 102 )       | ( 64, 12 )         |
| $a_9$    | ( 8.36, 15.12 )   | ( 65.04, 15.12 )  | ( 117.72, 15.12 ) | ( 171.64, 15.12 )  |
| $a_{10}$ | ( 8.36, 15.12 )   | ( 7.32, 15.12 )   | ( 4, 14 )         | ( 1.62, 12.06 )    |
| $a_{12}$ | ( 1.62, 7 )       | ( 6.72, 15.12 )   | ( 14.86, 0 )      | ( 19.10, 0 )       |

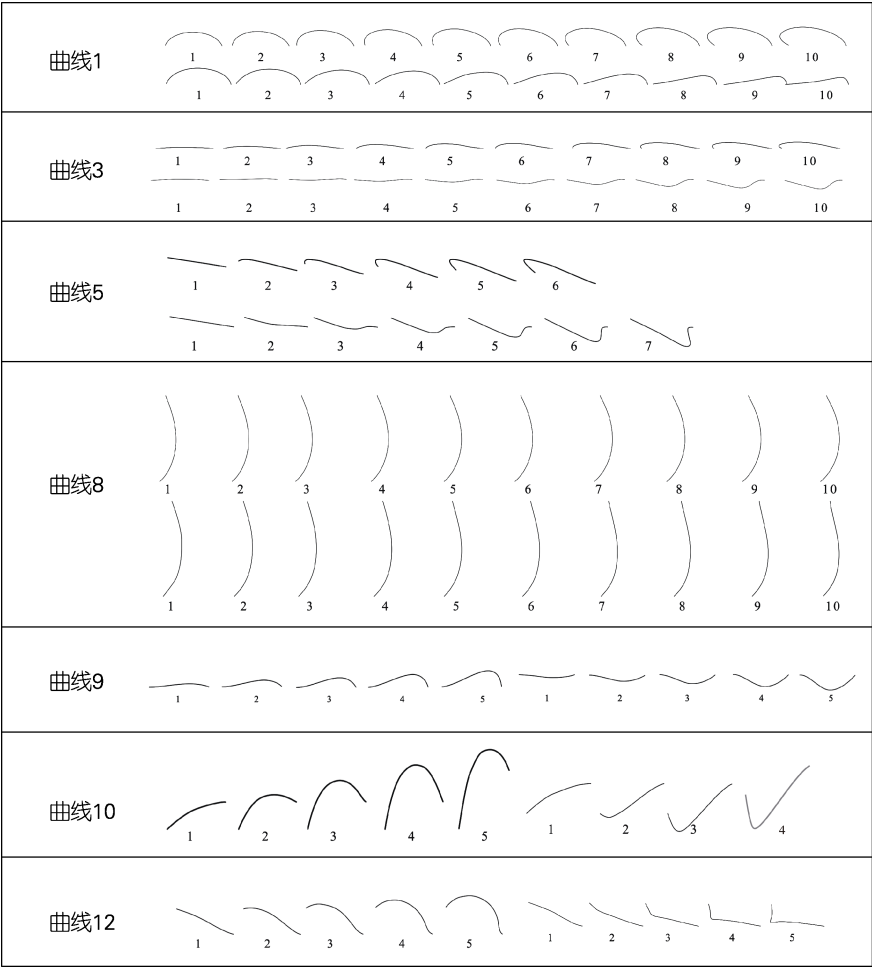


图 5 各曲线变化形态  
Fig.5 Change form of each curve

1) 吸引力。格式塔原则中接近性原则和连续性原则都包含了吸引力概念，如果曲线间的距离越近，则两者之间的吸引力就越大，在一组曲线中，距离更近的曲线容易被视觉视为一个整体。

2) 排斥力。排斥力是与吸引力互为反作用力的一种力的形式，根据对吸引力的定义，同理可得，曲线之间的距离越远，两者之间所形成的排斥力就越大，力场越明显。

3) 膨胀力。膨胀力是曲线受到力场的刺激而自身产生的力，使曲线呈现出向外扩张的趋势，在物理力场中形成向外延伸，对周围的环境和事物形成一种

压迫感，与之相对的是压缩力，两者均可视为是曲线自身的一种内应力。

4) 扭曲力。事物的扭曲是指因受到外力的作用而产生的扭转形变，由于曲线不具有三维空间体量特征，因此曲线的扭曲只能在二维平面中变化。当力场对曲线形成了局部刺激，曲线就会发生扭曲变形。

在上述曲线张力识别实验数据的基础上，根据公式计算用户感受到曲线张力的控制点变换临界值，并根据临界值与未感受到曲线视觉张力的控制点变换值进行比例换算，计算出曲线视觉张力表达的最小控制点变换值，如表 2 所示。

表 2 各曲线控制点变换临界值及最小变换值  
Tab.2 Transformation critical value and minimum transformation value of each curve control point

|       | 控制点变化规则       | $\Delta S_1$ (临界值)            | $\Delta S_2$ (最小变换值)          |
|-------|---------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 曲线 1  | (+,+) / (-,-) | ( 14.4°,14.4 ) / ( 12°,12 )   | ( 1.8°,1.8 ) / ( 3°,3 )       |
| 曲线 3  | (+,+) / (-,-) | ( 11°,11 ) / ( 9.9°,9.9 )     | ( 5.5°,5.5 ) / ( 4.95°,4.95 ) |
| 曲线 5  | (+,+) / (-,-) | ( 9.0°,9.0 ) / ( 8.9°,8.9 )   | ( 4.5°,4.5 ) / ( 4.45°,4.45 ) |
| 曲线 8  | (+,+) / (-,-) | ( 7.4°,7.4 ) / ( 10.1°,10.1 ) | ( 3.7°,3.7 ) / ( 5.05°,5.05 ) |
| 曲线 9  | (+,+) / (-,-) | ( 7.0°,7.0 ) / ( 6.8°,6.8 )   | ( 3.5°,3.5 ) / ( 3.4°,3.4 )   |
| 曲线 10 | (+,+) / (-,-) | ( 7.0°,7.0 ) / ( 6.1°,6.1 )   | ( 3.5°,3.5 ) / ( 3.05°,3.05 ) |
| 曲线 12 | (+,+) / (-,-) | ( 6.8°,6.8 ) / ( 6.6°,6.6 )   | ( 3.4°,3.4 ) / ( 3.3°,3.3 )   |

$$\Delta S_{li} = \sum_n^{i=1} \frac{n(\Delta \theta_{ij}, \Delta r_{ij})}{N} \quad (3)$$

式中,  $n$  为该变化值下的感知到曲线张力的人数;  $i$  为第  $i$  条曲线,  $i=1,3,5,8,9,12$ ;  $j$  为第  $j$  次变化;  $N$  为参与实验的总人数。

$$\Delta S_{2i} = \frac{\Delta S_{li}}{(\Delta \theta_k, \Delta r_k)} \quad (4)$$

式中,  $(\Delta \theta_k, \Delta r_k)$  为感知到曲线张力的变化值。

$$\Delta \bar{S}_1 = \sum_m \frac{\Delta S_{li}}{m} = (7.5^\circ, 7.5) \quad (5)$$

式中,  $m_1$  为临界值的个数。

根据表 2 的统计结果, 计算视觉张力产生的坐标变化平均临界值, 由式 (5) 得到曲线控制点变化坐标值的平均临界值为  $(7.5^\circ, 7.5)$ , 当曲线控制点坐标变化值为  $(7.5^\circ, 7.5)$  时, 曲线形态开始呈现出视觉张力。

$$\Delta \bar{S}_2 = \frac{\Delta S_{2i}}{m} = (3.8^\circ, 3.8) \quad (6)$$

式中,  $m_2$  为最小变换值个数。

根据表 2 的数据, 计算坐标变换的平均最小变换值, 由式 (6) 可得, 曲线控制点的坐标变化为平均最小变换值, 即曲线控制点坐标变化的最小递增或递减变换值为  $(3.8^\circ, 3.8)$ , 此时曲线能够在视觉上形成张力刺激。

在 MATLAB 环境中再次运行变换程序, 本次变换将代入 17 条曲线的控制点坐标, 以  $(7.5^\circ, 7.5)$  为变

换起始值,  $(3.8^\circ, 3.8)$  为最小变换数值进行曲线控制点坐标规律性变换, 由于坐标变化组合多样, 本文随机生成 66 份造型样本, 删除造型极度扭曲、三维软件无法模拟的 26 份样本, 对 40 份样本进行曲线形态视觉张力识别, 如图 6 所示。邀请 48 位参与者进行识别和选择, 其中有设计知识背景的参与者 20 位, 普通参与者 28 位。实验要求参与者选出在视觉上张力冲击最明显的曲线组合, 并以此为基础, 参考编码案例, 筛选出曲线组合中视觉力最明显的曲线段。

### 3.3 产品形态审美基因网络搭建及分析

产品基因网络搭建的目的是从曲线基因网络中, 找到一组节点, 使产品在审美评价上表现最优, 并从基因网络中找出影响造型审美的最重要的曲线基因节点。本研究的重点集中在用户对于产品造型的视觉张力评价, 即产品造型能否表现出视觉张力刺激消费者。根据前文产品曲线集合  $K$  可得, 产品造型基因网络的基因集合为  $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_{12}, a_{13}\}$ , 以此作为产品造型审美基因网络的节点, 每位参与者在图 6 的产品轮廓曲线中筛选出最具视觉张力的轮廓线组合, 同时标记出 13 条编码曲线中最具视觉冲击力的曲线, 由此供给产生 48 条数据, 导入 SPSS 数据分析软件, 运用 Pearson 相关性系数计算曲线之间的相关性, 以此建立起基因网络节点之间的连接。

将数据导入 SPSS 中进行 Pearson 相关性分析,

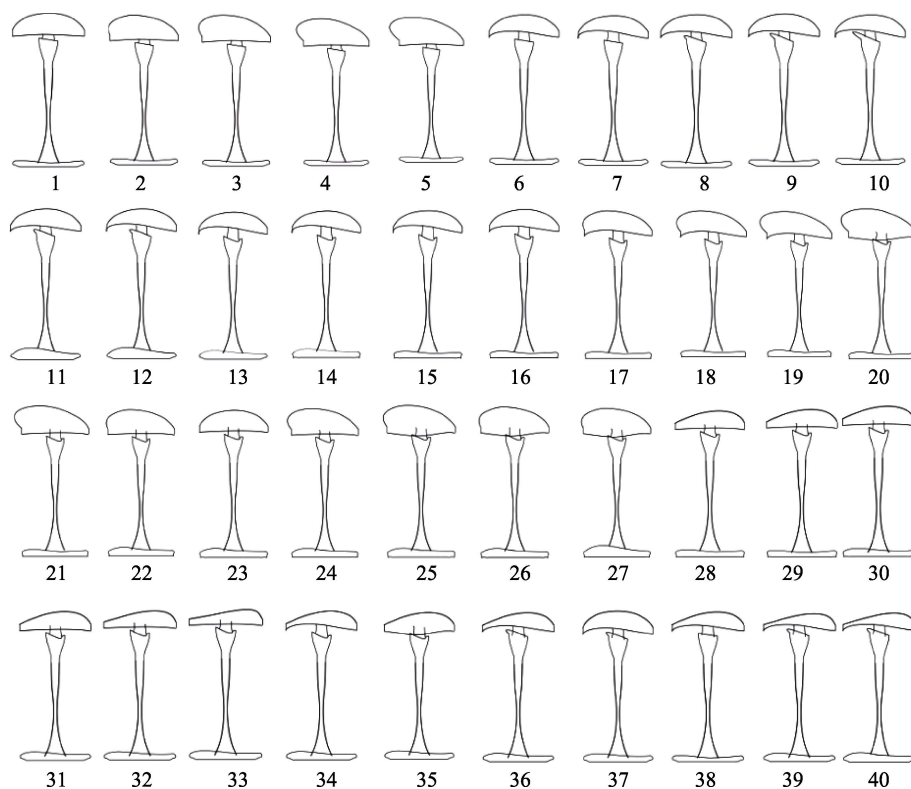


图 6 变换后部分产品轮廓曲线组合

Fig.6 Profile curve combination of some products after transformation

表 3 基因节点之间的 pearson 相关性系数  
Tab.3 Pearson correlation coefficient between gene nodes

| 节点       | $a_1$ | $a_2$  | $a_3$ | $a_4$  | $a_5$ | $a_6$ | $a_7$  | $a_8$ | $a_9$  | $a_{10}$ | $a_{11}$ | $a_{12}$ | $a_{13}$ |
|----------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|--------|----------|----------|----------|----------|
| $a_1$    | 1     |        |       |        |       |       |        |       |        |          |          |          |          |
| $a_2$    | 0.482 | 1      |       |        |       |       |        |       |        |          |          |          |          |
| $a_3$    | 0.299 | 0.252  | 1     |        |       |       |        |       |        |          |          |          |          |
| $a_4$    | 0.265 | 0.043  | 0.254 | 1      |       |       |        |       |        |          |          |          |          |
| $a_5$    | 0.191 | 0.098  | 0.205 | 0.405  | 1     |       |        |       |        |          |          |          |          |
| $a_6$    | 0.154 | 0.295  | 0.237 | 0.131  | 0.159 | 1     |        |       |        |          |          |          |          |
| $a_7$    | 0.414 | 0.250  | 0.669 | 0.240  | 0.259 | 0.244 | 1      |       |        |          |          |          |          |
| $a_8$    | 0.28  | 0.065  | 0.248 | -0.042 | 0.167 | 0.274 | 0.259  | 1     |        |          |          |          |          |
| $a_9$    | 0.331 | 0.076  | 0.507 | 0.209  | 0.377 | 0.114 | 0.383  | 0.373 | 1      |          |          |          |          |
| $a_{10}$ | 0.12  | 0.180  | 0.204 | 0.143  | 0.272 | 0.114 | -0.035 | 0.495 | 0.374  | 1        |          |          |          |
| $a_{11}$ | 0.025 | 0.011  | 0.059 | 0.154  | 0.139 | 0.121 | 0.036  | 0.096 | -0.072 | 0.478    | 1        |          |          |
| $a_{12}$ | 0.299 | -0.129 | 0.094 | 0.128  | 0.332 | 0.086 | 0.114  | 0.196 | 0.418  | 0.353    | 0.295    | 1        |          |
| $a_{13}$ | 0.169 | 0.024  | 0.247 | 0.117  | 0.141 | 0.154 | 0.056  | 0.227 | 0.217  | 0.247    | 0.118    | 0.258    | 1        |

可以获得各基因之间的相关性系数值，如表 3 所示。从 Pearson 相关性分析可知，当  $r<0.15$  时，变量间不存在相关性；当  $0.15<r<0.3$  时，变量之间为低相关性；当  $0.3<r<0.5$  时，变量之间存在中度相关性；当  $0.5<r$  时，变量间为强相关性。观察本文各参数的相关性数据，发现大部分处于中度相关，因此本文以  $r=0.15$ 、 $r=0.25$ 、 $r=0.35$ 、 $r=0.45$  为阈值节点，绘制产品形态

审美基因网络图，如图 7 所示。  
产品形态基因网络的主要功能是析出可以被设计者理解并运用的设计要点和知识，通过计算基因网络中的关键节点的度与敏感性及节点集团，可以析出两类设计要点，即对整体造型视觉表现影响度高的关键曲线以及共同表达相互牵制的曲线集，辅助设计者进行方案创新设计或优化设计。

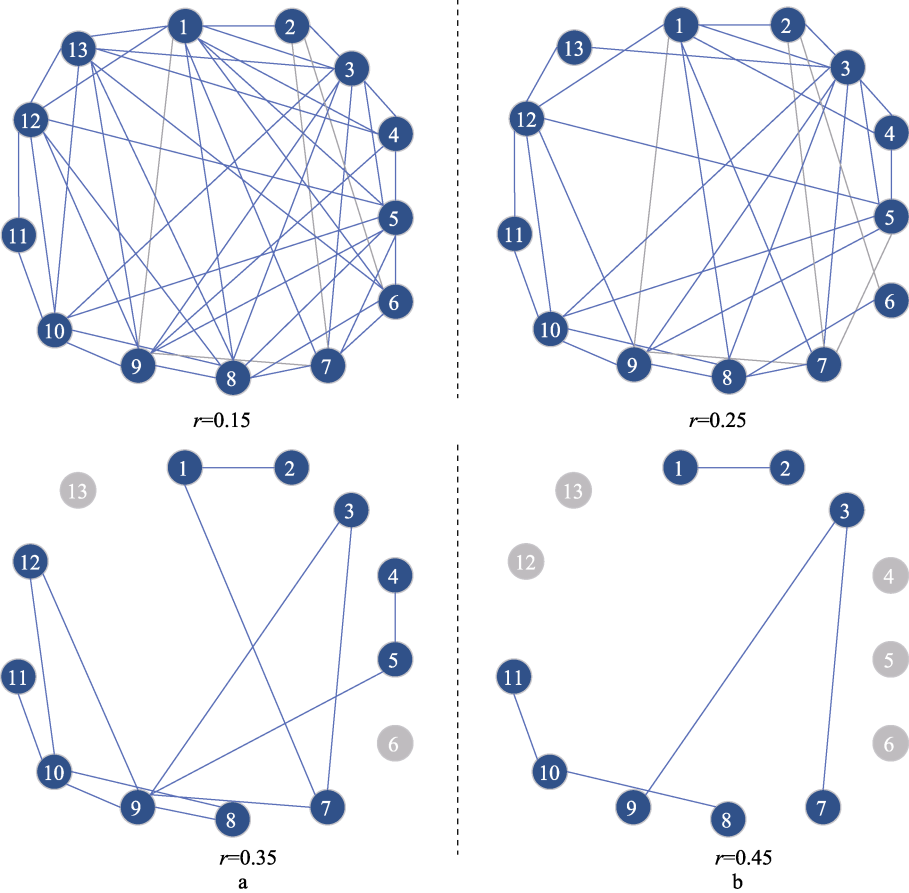


图 7 不同  $r$  值下产品形态审美基因网络  
Fig.7 Product form aesthetic gene network under different R values

1) 节点的度。在基因网络理论中, 节点的度是与该节点相连的边的条数, 记为  $L$ ,  $L$  的值越大说明该节点的重要性越高, 在整体形态的视觉表达层面影响度高, 13 个产品形态基因节点的度如表 4 所示。

表 4 各形态基因节点的度  
Tab.4 Degree of each morphological gene node

|     | $a_1$ | $a_2$ | $a_3$ | $a_4$ | $a_5$ | $a_6$ | $a_7$ | $a_8$ | $a_9$ | $a_{10}$ | $a_{11}$ | $a_{12}$ | $a_{13}$ |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|
| $L$ | 10    | 4     | 10    | 4     | 9     | 7     | 7     | 9     | 9     | 6        | 2        | 7        | 8        |

2) 节点的敏感性。本研究样本数据来源不包含参与者的评价信息 (即评分数据), 在计算节点敏感

性时, 使用方差作为节点的敏感系数, 衡量该基因节点受其他基因影响的程度, 记为  $v$ , 方差越大, 则该节点的敏感性越差, 越不稳定, 容易受其他基因的影响, 13 个产品形态基因节点敏感性系数如表 5 所示。

由表 5 可知,  $a_8, a_9$  的敏感性位于第一梯队, 稳定性差, 形态基因的变化对整体形态的影响大;  $a_1, a_3, a_{10}, a_{12}$  的敏感性位于第二梯队, 稳定性和形态基因对整体的影响均次之;  $a_2, a_5, a_7$  的敏感性位于第三梯队, 稳定性和形态基因对整体的影响适中;  $a_4, a_6, a_{11}, a_{13}$  的敏感性位于第四梯队, 稳定性强, 形态基因的变化对整体造型的影响低。

表 5 各形态基因节点的度  
Tab.5 Degree of each morphological gene node

| 节点          | $a_1$ | $a_2$ | $a_3$ | $a_4$ | $a_5$ | $a_6$ | $a_7$ | $a_8$ | $a_9$ | $a_{10}$ | $a_{11}$ | $a_{12}$ | $a_{13}$ |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|
| 敏感度 ( $v$ ) | 0.244 | 0.227 | 0.248 | 0.147 | 0.219 | 0.018 | 0.234 | 0.254 | 0.255 | 0.248    | 0.146    | 0.244    | 0.041    |

从不同阈值的产品形态审美基因网络中, 分析节点集团、独立节点以及节点的度等信息, 将产品审美基因网络中隐藏的设计基因转化为宏观的设计要点, 供设计者进行产品造型优化设计的参考:

1) 当相关度阈值为 0.45 时, 析出了三个节点集团 ( $a_1, a_2$ )、( $a_3, a_7, a_9$ ) 和 ( $a_8, a_{10}, a_{11}$ ) 以及 5 个独立节点 ( $a_4, a_5, a_6, a_{12}, a_{13}$ ), 在后续优化设计中, 属于节点集团中的曲线应进行协调设计。

2) 当  $r=0.35$  时, 析出两个独立节点  $a_{13}, a_6$ , 且敏感性位于第四梯队, 曲线 6 和曲线 13 为方案草图中重要的结构轮廓线, 影响产品的使用, 对整体形态的影响度低, 基因间的相关性不高, 因此在后续设计中, 此两个节点作为次要设计因素。

3) 当  $r=0.15$  时,  $a_1, a_3, a_5, a_8, a_9$  五个基因节点的度最高, 与其他基因节点的相关性高。由图 4 可知,  $a_1, a_3$  为台灯灯罩外轮廓曲线,  $a_5$  为连接结构的外轮廓曲线,  $a_8$  为灯架支撑外轮廓曲线,  $a_9$  为底座外轮廓曲线。另外除  $a_5$  之外, 其余四点均处于第一、二梯队, 敏感性高, 基因形态的变化对整体造型的影响高, 作为重要设计要素进行考虑。

4) 在后续设计中, 设计曲线 1 的形态时, 要结合曲线进行综合考虑; 设计曲线 3 的形态时, 要协调曲线 7 与曲线 9 的形态; 设计曲线 8 的形态时, 要协调曲线 10 和曲线 11 的形态走势。

4 设计优化及评估

4.1 析出设计知识的应用

根据析出的关键设计因子及产生视觉张力的曲线控制点变化临界值, 可知方案优化设计的重点为曲线 1、曲线 3、曲线 8 三条曲线, 并协调曲线 2、曲线 9、曲线 10 和曲线 11 的形态进行综合设计。在

MATLAB 中运行程序, 将各曲线的变换形态调整至 ( $\theta+7.5^\circ, r+7.5$ ), 在进行关键曲线节点设计时, 协调相关节点集团, 基于阅读书写视线人机数据要求, 利用 Rhino 进行三维建模, 如图 8 所示。

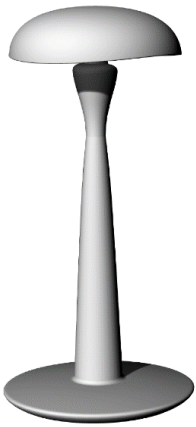


图 8 优化结果  
Fig.8 Optimization results

4.2 设计评估

将优化设计方案与原型方案进行视觉张力感知对照评估实验, 针对 42 位用户对造型整体的视觉张力、倾向性运动趋势以及曲线形态视觉力三方面进行评估, 采用 Likert7 级量表制作调查问卷, 如图 9 所示。

优化后的产品形态, 在整体造型张力、视觉倾向性运动趋势感知以及曲线视觉张力方面的评价均优于优化前的产品形态, 其中整体造型张力平均评分由 4.71 提高至 5, 视觉倾向性运动趋势感知由 4.55 提高至 4.83, 曲线视觉张力由 4.57 提高至 5.12, 说明通过设计优化后的产品形态的视觉张力表现优于方案原型, 辅助设计者挖掘视觉表现力中的隐形设计知识。方案对照评估结果分析见图 10。



图 9 对照评估实验

Fig.9 Control evaluation experiment

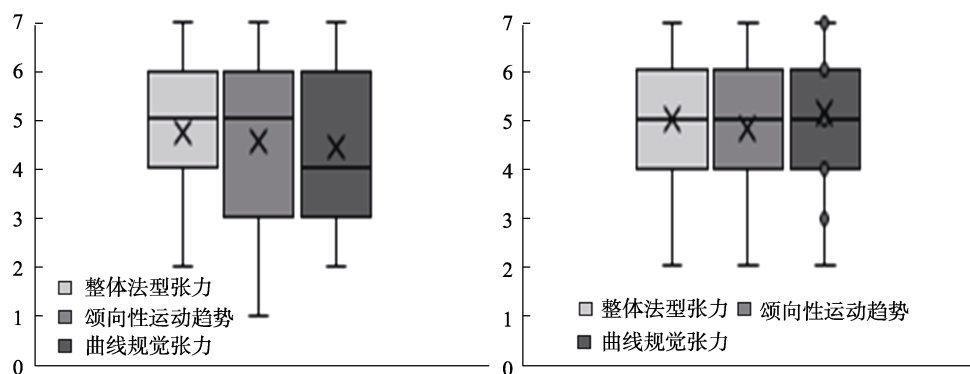


图 10 方案对照评估结果分析

Fig.10 Analysis of scheme comparison evaluation results

## 5 结语

通过三次贝塞尔曲线描绘产品外轮廓线,对产品轮廓线进行基因编码,结合基因网络对产品造型的曲线形态进行分析,找到对整体造型审美影响较大的曲线集团,并以此进行设计优化,使产品造型设计更符合消费者的审美习惯和偏好。

### 参考文献:

- [1] 魏丽芳. 产品形态的视觉认知研究[J]. 包装工程, 2016, 37(12): 134-138.  
WEI Li-fang. Visual Cognition of Product Form[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(12): 134-138.
- [2] 鲁道夫·阿恩海姆. 视觉思维审美直觉心理学[M]. 滕守尧, 译. 成都: 四川人民出版社, 1998.  
RUDOLF A. Visual Thinking[M]. RENG Shou-yao, Translated. Chengdu: Sichuan People's Publishing House, 1998.
- [3] 侯士江, 王建暖, 刘甲财, 等. 叉车造型的视觉动力分析及其意象仿生设计研究[J]. 包装工程, 2021, 42(22): 108-114.  
HOU Shi-jiang, WANG Jian-nuan, LIU Jia-cai, et al. Bionic Design of Forklift Truck Image Based on Visual Dynamic Theory[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(22): 108-114.
- [4] 宁海林, 王泽霞. 审美心理机制: 基于阿恩海姆视觉形式动力理论的解读与思考[J]. 西北大学学报(哲学社会科学版), 2016, 46(3): 154-158.  
NING Hai-lin, WANG Ze-xia. On Aesthetics Psychological Mechanism Based on Arnheim's Visual Form Dynamics[J]. Journal of Northwest University (Philosophy and Social Sciences Edition), 2016, 46(3): 154-158.
- [5] 李想. 工业产品设计中的视觉动力[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2016.  
LI Xiang. Visual power in industrial design[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2016.
- [6] 贾小军, 邓洪涛, 滕姿, 等. 应用轮廓线拟合提取蓝印花布图案基元[J]. 纺织学报, 2018, 39(8): 150-157.  
JIA Xiao-jun, DENG Hong-tao, TENG Zi, et al. Extraction of Image Elements for Blue Calico Based on Contour Fitting[J]. Journal of Textile Research, 2018, 39(8): 150-157.
- [7] WEI Hui, YANG Cheng-zhuan, YU Qian. Contour Segment Grouping for Object Detection[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2017, 48: 292-309.
- [8] 贺钰鑫, 余隋怀, 蒋超. 工业设计中产品形态基因杂交技术[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(20): 60-66.  
HE Yu-xin, YU Sui-huai, JIANG Chao. Hybridization Techniques of Product Form Gene in Industrial Design[J]. Science Technology and Engineering, 2017,

- 17(20): 60-66.
- [9] TANG C Y, FUNG K Y, LEE E W M, et al. Product Form Design Using Customer Perception Evaluation by a Combined Superellipse Fitting and ANN Approach[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2013, 27(3): 386-394.
- [10] CHEN Deng-kai, DING Jing-jing, GAO Min-zhuo, et al. Form Gene Clustering Method about Pan-Ethnic-Group Products Based on Emotional Semantic[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 29(6): 1134-1144.
- [11] FAN Kuo-kuang, CHIU C H, YANG C C. Green Technology Automotive Shape Design Based on Neural Networks and Support Vector Regression[J]. *Engineering Computations*, 2014, 31(8): 1732-1745.
- [12] DOGAN K M, SUZUKI H, GUNPINAR E, et al. A Generative Sampling System for Profile Designs with Shape Constraints and User Evaluation[J]. *Computer-Aided Design*, 2019, 111: 93-112.
- [13] 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.
- [14] 张文召, 吕健, 潘伟杰, 等. 多目标驱动的产品形态基因网络模型研究[J]. *图学学报*, 2019, 40(2): 335-343.
- ZHANG Wen-zhao, LV Jian, PAN Wei-jie, et al. Research on Model of Product Form Gene Network Driven by Multi-Objective[J]. *Journal of Graphics*, 2019, 40(2): 335-343.
- [15] 刘植, 何佳文, 陈晓彦, 等. 基于三次拟 Bézier 方法的汽车车灯轮廓设计[J]. *中国机械工程*, 2017, 28(19): 2300-2305.
- LIU Zhi, HE Jia-wen, CHEN Xiao-yan, et al. Automobile Headlamp Contour Design Based on Cubic Quasi-Bézier Methods[J]. *China Mechanical Engineering*, 2017, 28(19): 2300-2305.
- [16] 刘华, 王展, 李泽珩. 产品基因调控网络的设计知识析出新模式[J]. *机械设计*, 2021, 38(1): 127-134.
- LIU Hua, WANG Zhan, LI Ze-heng. A New Mode of Design Knowledge Extraction for Product Gene Regulatory Network[J]. *Journal of Machine Design*, 2021, 38(1): 127-134

责任编辑: 马梦遥

(上接第91页)

- [13] AHMED S, IRSHAD L, DEMIREL H O. Prototyping Human-Centered Products in the Age of Industry 4.0[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2021, 143(7): 1-15.
- [14] SCHMID A B, KUBLER P A, JOHNSTON V, et al. A Vertical Mouse and Ergonomic Mouse Pads Alter Wrist Position but do not Reduce Carpal Tunnel Pressure in Patients with Carpal Tunnel Syndrome[J]. *Applied Ergonomics*, 2015, 47: 151-156.
- [15] 杨磊. 垂直鼠标设计中的人机工程学应用分析[J]. *包装工程*, 2011, 32(8): 56-58.
- YANG Lei. Application Analysis of Ergonomics in Vertical Mouse Designs[J]. *Packaging Engineering*, 2011, 32(8): 56-58.
- [16] LIU Qi-yu, WANG Kai, LI Yan, et al. Data-Driven Concept Network for Inspiring Designers' Idea Generation[J]. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2020, 20(3): 1-12.
- [17] 侯亮, 林浩菁, 王少杰, 等. 基于运行数据驱动反向设计的复杂装备个性化定制[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(8): 65-80.
- HOU Liang, LIN Hao-jing, WANG Shao-jie, et al. Mass Personalization for Complex Equipment Based on Operating Data-Driven Inverse Design[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(8): 65-80.
- [18] 张建辉, 檀润华, 张争艳, 等. 计算机辅助创新技术驱动的产品概念设计与详细设计集成研究[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(5): 47-57.
- ZHANG Jian-hui, TAN Run-hua, ZHANG Zheng-yan, et al. Research on the Integration of Product Concept Design and Particular Design Driven by CAI Technology[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(5): 47-57.
- [19] ALCAIDE-MARZAL J, DIEGO-MAS J A, ACOSTA-ZAZUETA G. A 3D Shape Generative Method for Aesthetic Product Design[J]. *Design Studies*, 2020, 66: 144-176.

责任编辑: 马梦遥