

基于拓扑理论的产品仿生形态进化设计方法

苏建宁, 朱赫, 杨文瑾, 肖丽薇
(兰州理工大学 设计艺术学院, 兰州 730050)

摘要: **目的** 为了更好地在定量层面控制产品形态仿生设计, 快速地获得多种方案, 运用拓扑理论和猴王遗传算法, 构建出产品仿生形态进化设计方法。**方法** 首先, 利用拓朴权值, 识别仿生对象的特征要素。然后, 对产品形态与仿生对象特征要素进行拓朴相似度评价, 以此为适应度函数, 应用猴王遗传算法实现高效的产品仿生形态进化设计。**结果** 以“企鹅—水壶”仿生形态设计为例, 对该方法进行实例研究, 结果表明, 它能够比较合理地保留仿生对象特征要素, 并且能够较高效率地提供多样化方案。**结论** 在产品仿生形态设计中, 充分考虑仿生对象的特征要素, 量化产品形态与仿生对象之间的认知距离, 再结合进化算法, 使产品仿生形态设计更加理性和高效。

关键词: 拓扑理论; 产品仿生形态; 进化设计; 猴王遗传算法

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)10-0129-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.10.020

Bionic Form Evolution Design Method of Product Based on Topology Theory

SU Jian-ning, ZHU He, YANG Wen-jin, XIAO Li-wei
(School of Design Art, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

ABSTRACT: The work aims to better control the bionic form design of product at the quantitative level to quickly obtain a variety of designs, and establish the bionic form evolution design method of product by means of the topology theory and monkey king genetic algorithm. The first step was to identify the characteristic elements of bionic objects based on the topological weights. Then, the topology similarity evaluation was carried out for product form and bionic object's characteristic elements. Taking it as the fitness function, the monkey king genetic algorithm was applied to achieve efficient bionic form evolution design. The case study of the proposed method was conducted with the "Penguin-kettle" bionic form design as an example. The results showed that, the model could accurately retain the characteristic elements of bionic objects and efficiently provide diversified designs. In the bionic form design of product, the cognitive distance between the product form and the bionic object is quantified with the characteristic elements of bionic objects taken into full consideration, and the monkey king genetic algorithm is combined to enable the bionic form design of product to be more rational and efficient.

KEY WORDS: topology theory; bionic form of product; evolution design; monkey king genetic algorithm

随着感性消费的日益增加, 产品形态仿生设计成为近年来研究的热点。优秀的形态仿生能够通过模仿和借用自然形态, 传达出产品内在的功能性、象征性、趣味性和关怀性^[1]。许多学者在产品形态仿生领域进行了一系列的研究, 如金海明^[2]提出了产品仿生设计, 从产品形态、产品色彩等角度入手实现情感化设

计; 杜鹤民等^[3]提出了基于产品造型语义和功能语义的产品仿生形态设计基本流程; 袁雪青等^[4]提出了建立基于用户意象的仿生设计基因库思想和方法流程, 辅助设计师获取仿生原型。

目前在设计学领域中, 仿生形态设计研究大多在定性层面展开。本研究提出基于拓扑理论的产品仿生

收稿日期: 2020-03-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51465037); 兰州理工大学红柳杰出人才培养计划(J201406)

作者简介: 苏建宁(1974—), 男, 甘肃人, 博士, 兰州理工大学设计艺术学院教授, 主要研究方向为工业设计、感性工学、智能化设计等。

形态进化设计方法,以“企鹅—水壶”仿生为例,对企鹅本体特征进行提取,从人的认知角度出发,计算仿生产品形态与生物本体的特征相似度,形成拓扑相似度评价模型。然后结合猴王遗传算法构建进化机制,在相对定量层面上保留生物本体特征,建立产品仿生形态进化设计系统,验证该方法的可行性,从而为仿生形态设计研究与实践提供新的思路和方法。

1 研究框架

基于拓扑理论的产品仿生形态进化设计分为四个部分,分别是特征分析、特征识别、评价机制、形态进化。研究框架见图1。特征分析是利用拓扑知觉理论并参考生物形态学,对仿生对象进行拓扑结构特征分析,建立特征拓扑图;特征识别是通过计算拓扑关系权值以获得生物的重要特征,进而提取特征节点与结构线;评价机制是应用拓扑相似性评价模型,对仿生对象特征结构线与对应产品结构进行特征要素拓扑相似性比较;形态进化是应用猴王遗传算法,进行样本排序、基因复制、引入替换样本和交叉变异,提出满足目标需求的产品形态设计方案。

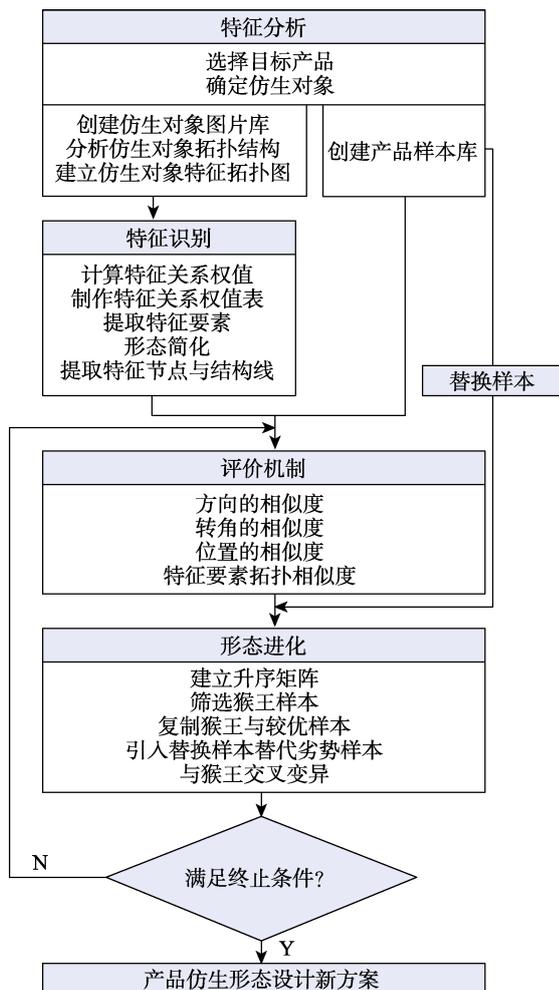


图1 研究框架

Fig.1 Research framework

2 特征分析

依据拓扑性质知觉理论,识别事物是从整体到局部,在识别过程初期,通过感知大范围的拓扑性质产生心理认知,因此“整体”概念可理解为对象的拓扑性质^[5]。在拓扑学研究中,拓扑性质指几何图形在拓扑变换下的不变性质,其主要关注图形间的位置关系^[6]。

2.1 分析仿生对象拓扑结构

仿生对象的拓扑结构可理解为进化过程中形态具有稳定识别范式的组织结构,分析仿生对象拓扑结构有助于整体把握其形态特征。对于仿生设计,对象的形态应具备认知共性,因此依据能够体现生物形态主要特征的常用摄影角度来确定常态角度,拓扑结构的划分是参考生物形态学对常见动植物按纲属的划分实现的^[7],如鸟纲的物理拓扑结构为头部、颈部、躯干、下肢、翼部、尾部等。

2.2 建立仿生对象特征拓扑图

拓扑结构可分为物理拓扑结构和逻辑拓扑结构。逻辑拓扑结构是认知过程中思维的稳定范式,例如总线型、星型、环型及树型等。树型结构由整体到局部的分析模式更符合一般人的认知顺序,有利于寻找自身目标,因此本研究运用树型结构建立仿生对象的特征拓扑图。

拓扑图的层级按照认知中仿生对象形态特征的稳定性进行排序:第一层级为受众知觉所把握的整体组织 F,即生物原型形态;第二层级为显著特征结构,即易建立起形态认知的生物局部特征结构,如牛角、象鼻等;第三层级为生物纲属的主要拓扑结构 A_n ;第四层级为生物二级特征结构 B_n ,表示以每个拓扑结构特征为整体,与同纲具有普遍认知性的“标杆生物”相比较而具有自身形态特点的局部特征;第五层级为生物三级特征结构 C_n ,表示与同科“标杆生物”相比较而具有自身形态特点的细节特征,仿生对象特征拓扑图见图2。

3 特征识别

利用拓扑权值概念,计算仿生对象各形态特征的结构关系关联度,以识别其特征要素与非特征要素。特征要素是在视知觉整体识别中建立起形态认知的拓扑结构特征,非特征要素是对形态认知影响甚微的拓扑结构特征。本研究以仿生形态轮廓线作为研究对象,通过计算拓扑权值提取特征要素中的特征节点与特征结构线。

3.1 计算特征拓扑关系权值

利用拓扑性质形式化描述拓扑关系^[8],特征拓扑关系及权值见表1。

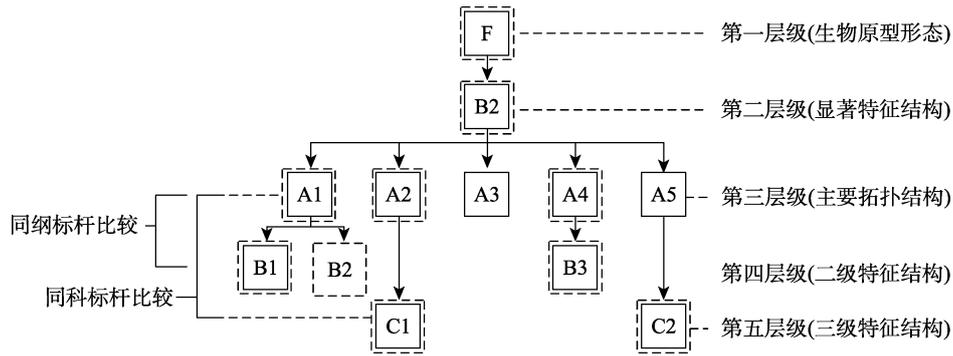


图 2 仿生对象特征拓扑图
Fig.2 Characteristic topology of bionic objects

表 1 特征拓扑关系及权值
Tab.1 Topological relations and weights of characteristics

拓扑关系语义划分	形式化定义	拓扑权重
相离 (Disjoint)	两目标边界和内部没有共同部分	1
相邻 (Touch)	两目标有比本身更低维的公共部分, 且该公共部分为 A 或 B 的边界	2
相交 (Cross)	表示两目标有比其本身更低维的公共部分, 且该公共部分非边界	3
包含 (In)	如果目标 B 的内部和边界均在目标 A 的内部, 则称 A 包含 B	4
相等 (Equal)	目标边界和内部相同	5

特征拓扑权值由式(1)计算。

$$S(ip, mq) = \sum_{k=m}^j Ik \times \lambda \times Mk(ip, mq)$$

$$Ik = 2^{k-1}; \lambda = 1 / (2^{\Delta k});$$

$$(i, m, j \in N \quad i \leq m \leq j \quad i, m, j \leq Q, Q \text{ 为最高层数}) \quad (1)$$

式中: i 、 m 分别表示特征对象 p 、 q 所在层级, k 表示层级, $S(ip, mq)$ 表示从 m 层到 j 层 ip 与 mq 的总拓扑权值, $Mk(ip, mq)$ 指 ip 与 mq 在第 k 层的拓扑权重, Ik 为第 k 层的层级系数, λ 为衰减系数, Δk 表示 ip 与 mq 间隔的层数。

根据拓扑权值计算结果, 可直观地得出仿生对象特征及特征关系在整体认知中的重要程度, 拓扑权值较高的结构要素为仿生形态的特征要素。在设计过程中, 通过保留主要特征、删除权值较低的次要特征, 以及采用平滑混合方式修整轮廓线, 完成形态的简化。

3.2 提取特征节点与特征结构线

产品形态设计中常用轮廓特征线表达物体形态及其构造方式, 特征线由若干特征节点构成。特征节点为物体轮廓转折处或特殊的细节特征处, 对特征要素中的每一个节点进行拓扑权值计算, 筛选出权值较高特征节点以构成特征结构线。特征结构线能够代表仿生对象原型形态, 是仿生对象拓扑结构中具有较高的识别稳定性的组织结构。在产品仿生设计中, 保持特征结构线的拓扑结构相似, 有助于保持仿生对象特征的识别性, 从而有效展开形态设计。

4 评价机制

与仿射性质、射影性质、欧式性质等局部几何性质相比, 拓扑性质发生在视知觉过程的早期, 具有更强的稳定性, 拓扑结构差异会对认知产生很大影响^[9-10]。在产品仿生形态设计中, 保持良好的特征识别性, 就需要保持拓扑结构的稳定性。根据拓扑性质关注特征间位置关系的特性, 利用拓扑相似度模型, 计算产品形态与仿生对象特征结构线中各特征节点结构关系与分布状况的相似程度^[11], 从而量化两者之间的认知距离, 在定量层面对匹配过程进行控制。

拓扑相似度 (TSIM, Topology Similarity) 通过拓扑结构距离 (TSDIS, Topology Structural Distance) 来衡量^[12], TSDIS 选择三项指标, 分别是方向相似度 $D_d(L_a, L_b)$ 、转角相似度 $D_a(L_a, L_b)$ 、位置相似度 $D_l(L_a, L_b)$ 。 L_a, L_b 分别为仿生对象特征结构线和产品特征结构线, 结构线 L_a 由 $P_{a1}, P_{a2}, \dots, P_{an}$ 结构段组成, 对比时需对 L_a, L_b 所有段依次进行比较。

4.1 方向的相似度

方向相似度是指相对于结构线 L_a, L_b 在运动趋势上的偏转程度, 方向比较见图 3, 依据式(2)计算。

$$D_d(L_a, L_b) = \begin{cases} \min(\|L_a\|, \|L_b\|) \times \sin(\alpha), & 0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \\ \min(\|L_a\|, \|L_b\|), & 90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ \end{cases} \quad (2)$$

式中: α 表示结构段的方向夹角, $\|L_a\|, \|L_b\|$ 为两

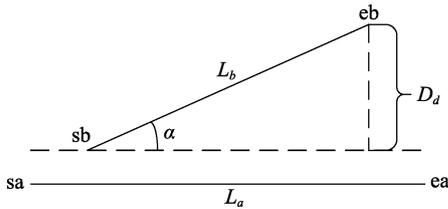


图3 方向比较
Fig.3 Direction comparison

结构线分段长度。方向信息比较中，两个结构段的方向相同且夹角 α 较小时相似性较高，这时 $D_d(L_a, L_b) \approx 0$ 。两个结构段的方向相反且夹角 α 较大时相似性较低，这时 $D_d(L_a, L_b)$ 数值为较短结构段长度。

4.2 转角的相似度

结构段转角相似度见图4，转角的相似度反映了结构线内部的转折变化特征，转角对比过程如图4a，结构段转角如图4b。结构转角 β 为相邻结构分段的转向角，反映了结构段的转折趋势，数值由结构段的转折方向来决定，规定外向转角 β_1 为正，内向转角 β_2 为负。相邻结构分段在采样特征节点处的夹角为 ϕ ， u, v 为其邻边， w 为其对边。 ϕ, β 由式(3)(4)计算，则转角相似度由式(5)计算。

$$\phi = \arccos((u^2 + v^2 - w^2) / 2uv) \quad (3)$$

$$\beta = \begin{cases} \pi - \phi, \vec{u} \times \vec{v} \geq 0 \\ \phi - \pi, \vec{u} \times \vec{v} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$D_d(L_a, L_b) = \frac{\sum_1^{\min(P(L_a), P(L_b))} (|\beta_a - \beta_b|) / (|\beta_a| + |\beta_b|)}{P(L_a) + P(L_b)} \quad (5)$$

式中： $P(x)$ 表示结构线中特征点的个数。若两结构线每个转角都匹配，则 $D_d(L_a, L_b)$ 为 0，若每个转角互为相反方向，即两条结构线呈对立锯齿状，则 $D_d(L_a, L_b)$ 为 1。

4.3 位置的相似度

位置的相似度是通过 Hausdorff 距离公式来衡量结构线的位置相似程度，由式(6)计算。

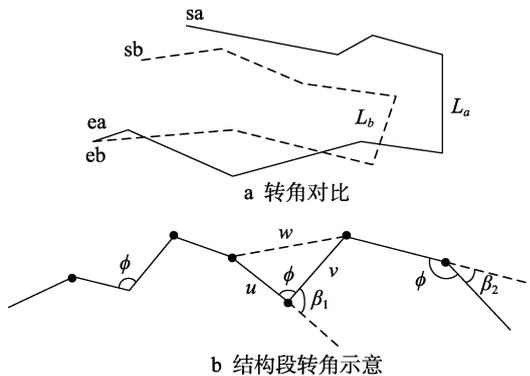


图4 结构段转角相似度
Fig.4 Structure section angle similarity

$$D_l(L_a, L_b) = \max(h(L_a, L_b), h(L_b, L_a))$$

$$h(L_a, L_b) = \max_{m \in L_a} (\min_{n \in L_b} (E(m, n))) \quad (6)$$

式中： $h(L_a, L_b)$ 为 L_a, L_b 直接 Hausdorff 距离，即 L_a 中的点到最近 L_b 中的最大距离， $E(m, n)$ 表示点之间的欧式距离。

4.4 拓扑相似度

生物体和对应产品特征结构线的拓扑结构距离 $TSDIS(L_a, L_b)$ 由式(7)计算，拓扑相似度 $TSIM(L_a, L_b)$ 由式(8)计算。

$$TSDIS(L_a, L_b) = D_d(L_a, L_b) \times \frac{1}{3} + D_l(L_a, L_b) \times \frac{1}{3} + D_l(L_a, L_b) \times \frac{1}{3} \quad (7)$$

$$TSIM(L_a, L_b) = 1 - N(TSDIS(L_a, L_b)) \quad (8)$$

式中： $N(x)$ 为距离的归一化函数。

$TSIM(L_a, L_b)$ 体现了结构线 L_a, L_b 拓扑结构之间的相似程度，因此，其值越大表示结构线 L_a, L_b 越相似，反之越不相似。本研究利用拓扑相似度模型作为进化设计中的适应度函数，筛选出形态相似度较高的仿生产品方案。

5 形态进化

许多产品形态设计以形态改良设计为主，其核心是以成功实例为基础解决新问题。这些都可以基于遗传算法的产品形态进化设计来实现。猴王遗传算法思想来源于自然界中猴王在猴群中具有绝对基因遗传优先权的模式，猴王遗传算法见图5^[13]。

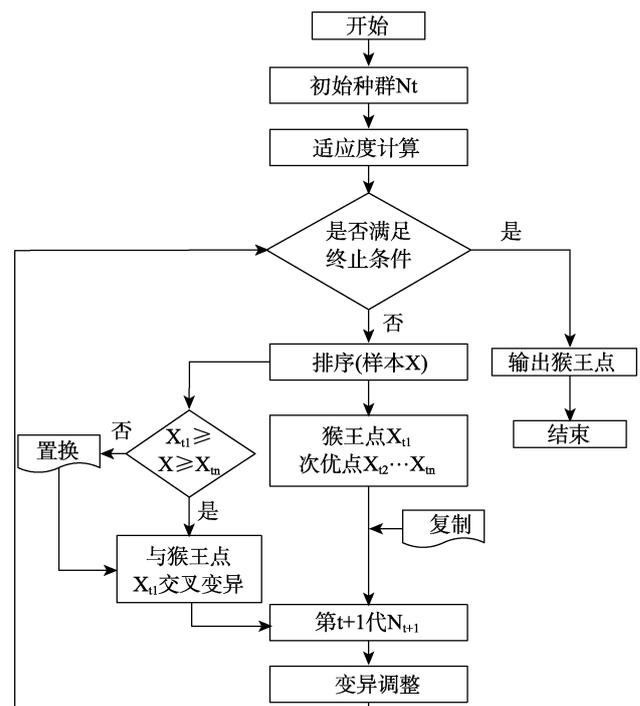


图5 猴王遗传算法
Fig.5 Monkey king genetic algorithm

应用猴王遗传算法，将最优（猴王基因）及次优样本复制至下一代种群中，余下的个体进行淘汰并引入替换样本，将子代与猴王基因交叉、变异，获得新一代种群，这样既保留了其特征基因，又保证了染色体的多样性。本研究利用猴王遗传算法，建立仿生形态进化设计系统，以拓扑相似度最高的实例作为猴王产品，使子代产品与仿生对象保持较高的拓扑相似性，实现能够较快为设计师提供多样化产品仿生形态设计方案的目标。

6 应用实例

本研究以水壶壶身的仿生形态设计为例。通过对水壶各形态要素特征进行解析，选择与其具有一定形态相似性的企鹅为仿生对象。通过各种渠道进行设计

调查，建立生物体图片库，收集现有企鹅仿生水壶代表性样本，建立产品样本库，仿生产品样本库见图 6。

首先，确定企鹅的常态角度为“站姿—侧视”。然后，依据认知稳定性，绘制树型企鹅特征拓扑图：（1）第一层级为企鹅整体形态；（2）企鹅无“显著特征”，因此无第二层级；（3）由于企鹅属鸟纲，则第三次层级为鸟纲主要拓扑结构；（4）第四层级为企鹅二级特征结构，与鸟纲标杆生物鸽子相比较，标杆生物与生物拓扑结构见图 7，企鹅在头部、翼部、尾部特征及躯干与下肢的拓扑关系上具备特征性，由此可进一步将其喙部、蹼部划分为局部特征；（5）将其与同科标杆生物——麻雀进行比较，无更多细分特征，因此无第五层级。综上，企鹅的特征拓扑图主要分为三层，即生物原型形态、主要拓扑结构、二级拓扑结构，企鹅特征拓扑图见图 8。



图 6 仿生产品样本库
Fig.6 Bionic product sample library



图 7 标杆生物与生物拓扑结构
Fig.7 Benchmark creature and biological topology

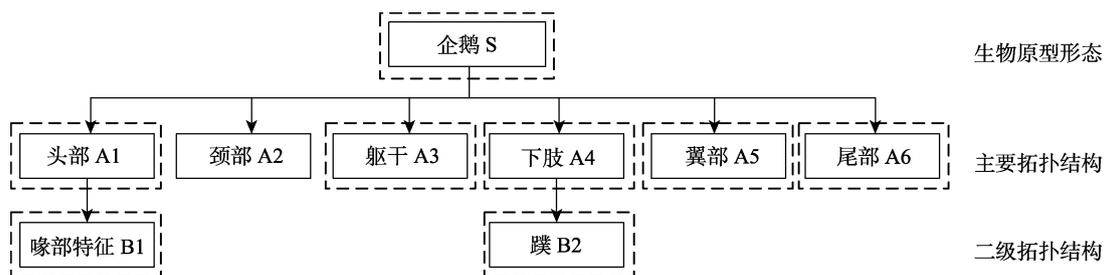


图 8 企鹅特征拓扑图
Fig.8 Penguin characteristic topology

表2 企鹅特征拓扑权值

Tab.2 Topological weights of penguin characteristics

总权值	A1	A3	A4	A5	A6	B1	B2
A1	20	12	12	12	12	9	6
A3	12	20	16	14	16	11	11
A4	12	16	20	12	12	6	9
A5	12	14	12	20	12	11	11
A6	12	16	12	12	20	11	11
B1	9	11	6	11	11	15	7
B2	6	11	9	11	11	7	15
特征关系	A3A4	A3A6	A3A5	A4A5	A4A6	A1A3	A1A4
拓扑权值	16	16	14	12	12	12	12

根据特征拓扑图，计算企鹅特征的拓扑权值，企鹅特征拓扑权值见表2。

依据企鹅特征关系拓扑权值分析，企鹅形态结构中主要特征关系为A3A4（躯干与下肢）、A3A6（躯干与尾部），次要特征关系为A3A5（躯干与翼部），特征要素为最主要特征关系中共有特征A3（躯干）。

形态特征简化与节点拓扑权值见图9，可依据拓扑权值进一步简化特征结构，增设辅助线修整轮廓线，对蹠部与尾部特征进行平滑混合，如图9a。对主要特征关系躯干与下肢、躯干与尾部轮廓线，在其轮廓转折处或特殊的细节特征处选择相同数量特征节点，节点拓扑权值见表3，特征节点如图9b。躯干与下肢轮廓线的特征节点权值之和较大，因此视其为特征结构线。

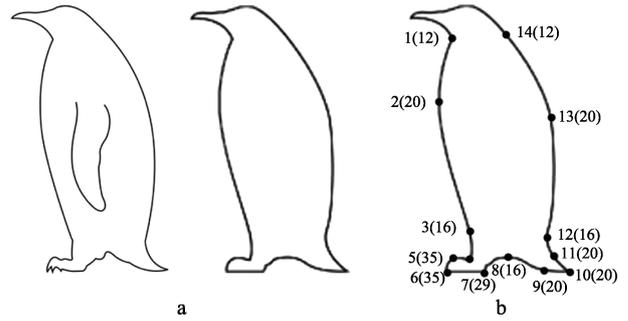


图9 形态特征简化与节点拓扑权值
Fig.9 Form characteristic simplification and node topological weight

表3 节点拓扑权值

Tab.3 Node topological weights

特征节点	A3A4（躯干与下肢）							A3A6（躯干与尾部）						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
拓扑权值	12	20	16	29	35	35	29	16	20	16	20	16	20	12
权值之和	176							120						

系统界面初始显示样本库中的八个样本，在相似度计算模式下，对生物特征结构线与水壶产品相应部位结构线进行拓扑相似度比较，根据拓扑相似度模型得到 D_{d1} 、 D_{a1} 、 D_{l1} 、 T_1 四个矩阵，拓扑相似度计算界面见图10，形态进化时依次筛选初始种群中最优猴王基因和次优基因。

$$D_{d1} = [1.4317 \ 0.8461 \ 1.2147 \ 1.3622 \ 1.2936 \ 1.3400 \ 1.3556 \ 0.8362]$$

$$D_{a1} = [3.4247 \ 3.6829 \ 4.0070 \ 3.8739 \ 3.6052 \ 3.8502 \ 4.3014 \ 3.4434]$$

$$D_{l1} = [34.6302 \ 31.2570 \ 33.9779 \ 36.3551 \ 26.4745 \ 34.7212 \ 35.3276 \ 29.5677]$$

$$T_1 = [0.7760 \ 0.7627 \ 0.7659 \ 0.7713 \ 0.7633 \ 0.7699 \ 0.7653 \ 0.7637]$$



图10 拓扑相似度计算界面
Fig.10 Computing interface of topology similarity

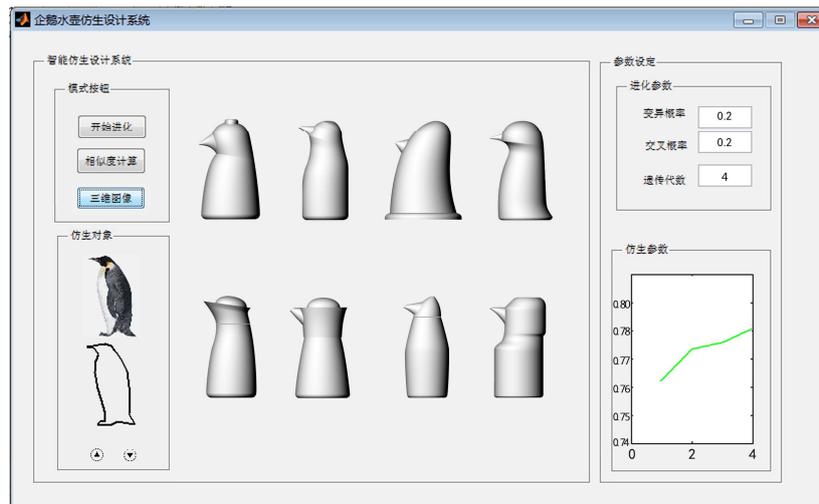


图 11 企鹅水壶仿生设计系统
Fig.11 Bionic design system of penguin kettle

形态进化模式下,设计师依其需求从样本库中选择其中六个作为初始种群,依据拓扑相似度矩阵,最大值样本为初始种群中的最优,即猴王基因,依照猴王遗传算法进化机制,保留概率为 0.5,将拓扑相似度排在 2~4 位的样本作为次优,复制到下一代种群中,得到下一个种群中的四个子代个体,余下的个体进行淘汰并引入新样本。进化至自定义第四代时,产生的新形态可作为产品形态仿生设计方案,在三维图像模式下,将线框图像转为三维立体图像显示,企鹅水壶仿生设计系统见图 11。

设计师可选择其中一款进行深入设计。界面中仿生参数表示每代种群中猴王拓扑相似度,呈明显上升趋势,验证了该方法的可行性。

7 结语

为提高产品形态仿生设计的效能,运用拓扑学理论计算相似度,结合猴王遗传算法特性,保留主要特征,提出一种仿生形态进化设计方法,主要结论如下:(1)基于拓扑理论可构建仿生对象特征要素的筛选机制,有效保障了仿生形态设计中的特征识别性;(2)通过计算产品形态与仿生对象特征结构线的拓扑相似程度,可以量化两者之间的认知距离,进而在定量层面对匹配过程进行控制;(3)以拓扑相似度作为适应度函数,结合猴王遗传算法可展开产品形态仿生进化设计。以企鹅—水壶仿生设计为例,验证了该方法的可行性,能实现较快地为设计师提供多样化产品仿生形态设计方案的目标。

参考文献:

[1] 曹建中. 产品语意特征分析[J]. 包装工程, 2010, 31(20): 52-54.
CAO Jian-zhong. Semantic Features Analysis of Prod-

ucts[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(20): 52-54.
[2] 金海明. 产品造型的仿生设计研究[J]. 机械设计, 2014, 31(1): 123-125.
JIN Hai-ming. Bionic design of product design[J]. Mechanical Design, 2014, 31(1): 123-125.
[3] 杜鹤民. 基于产品语义的形态仿生设计方法研究[J]. 包装工程, 2015(10): 60-63.
DU He-min. Morphology Bionic Design Based on Product Semantics[J]. Packaging Engineering, 2015(10): 60-63.
[4] 袁雪青, 陈登凯, 杨延璞, 等. 意象关联产品形态仿生设计方法[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(8): 178-182.
YUAN Xue-qing, CHEN Deng-kai, YANG Yan-pu, et al. Image Associated Products Morphology Bionic Design Methods[J]. Computer Engineering and Applications, 2014, 50(8): 178-182.
[5] CHEN L. Topological Structure in Visual Perception[J]. Science, 1982, 218(4573): 699-700.
[6] ADAMS C, FRANZOSA R. 拓扑学基础及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
ADAMS C, FRANZOSA R. Topology Basics and Applications[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2010.
[7] 曹凯鸣. 现代生物科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
CAO Kai-ming. Introduction to Modern Biological Sciences[M]. Beijing: Higher Education Press, 2011.
[8] 曹雪峰. 复杂体目标之间三维拓扑关系描述模型[J]. 地理与地理信息科学, 2013, 29(1): 12-14.
CAO Xue-feng. 3D Topological Relation Description Model between Complex Objects[J]. Geography and Geo-information Science, 2013, 29(1): 12-14.
[9] CHEN L. The Topological Approach to Perceptual Organization[J]. Visual Cognition, 2005, 12(4): 553-637.
[10] 朱滢. 陈霖的拓扑性质知觉理论[J]. 心理科学, 2005, 28(5): 1031-1034.
ZHU Ying. Chen Lin's Topological Nature Perception Theory[J]. Acta Psychologica Sinica, 2005, 28(5): 1031-1034.
(下转第 149 页)

- 院学报, 2006(2): 367-369.
WANG Ying-jie. Functional Integration of Consumer Electronic Products[J]. Journal of East China Institute of Technology, 2006(2): 367-369.
- [3] 吴江, 莫逸凭. 共生式产品整合设计研究[J]. 包装工程, 2011, 32(24): 65-68.
WU Jiang, MO Yi-ping. Symbiotic Product Integration Design[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(24): 65-68.
- [4] 张云帆, 刘卓. 基于品牌意象基因提取的产品族造型设计[J]. 机械设计, 2018, 35(3): 105-109.
ZHANG Yun-fan, LIU Zhuo. Product Family Modeling Design Based on Brand Image Gene Extraction[J]. Mechanical Design, 2018, 35(3): 105-109.
- [5] 章文, 管少平. 厨房小家电产品的整合设计[J]. 大众文艺, 2013(13): 127-128.
ZHANG Wen, GUAN Shao-ping. Integrated Design of Kitchen Appliances[J]. Popular Literature and Art, 2013(13): 127-128.
- [6] 付治国, 栾丽君, 张艳平. 面向质量工程的产品设计模糊评价研究[J]. 机械设计, 2014, 31(2): 111-114.
FU Zhi-guo, LUAN Li-jun, ZHANG Yan-ping. Fuzzy Evaluation of Product Design Oriented to Quality Engineering[J]. Mechanical Design, 2014, 31(2): 111-114.
- [7] 薛青, 黄子聪. 一种多功能搅拌机主体: 中国, 201420410820.3[P]. 2015-01-28.
XUE Qing, HUANG Zi-cong. A Multi-functional Mixer Main Body: China, 201420410820.3[P]. 2015-01-28.
- [8] 张平亮. 新型食品搅拌机的原理、结构及其应用[J]. 食品工业, 2013, 34(10): 188-189.
ZHANG Ping-liang. Principle, Structure and Application of a New Type of Food Mixer[J]. Food Industry, 2013, 34(10): 188-189.
- [9] 张红娟, 蔡正伟. 全自动食品搅拌机的开发及研究[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(1): 212-214.
ZHANG Hong-juan, CAI Zheng-wei. Development and Research of Fully Automatic Food Mixer[J]. Food Research and Development, 2017, 38(1): 212-214.
- [10] 阮宝湘. 工业设计人机工程(第3版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
RUAN Bao-xiang. Ergonomics in Industrial Design(3rd Edition)[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2017.
- (上接第135页)
- [11] 张晓闻, 靳雁霞, 银莉, 等. 融合粒子群与拓扑相似性的图像匹配算法研究[J]. 微电子学与计算机, 2017, 34(3): 95-99.
ZHANG Xiao-wen, JIN Yan-xia, YIN Li, et al. Image Matching Algorithm Based on Fusion of Particle Swarm Optimization and Topology. Microelectronics and Computer, 2017, 34(3): 95-99.
- [12] 袁冠, 夏士雄, 张磊, 等. 基于结构相似度的轨迹聚类算法[J]. 通信学报, 2011, 32(9): 103-110.
YUAN Guan, XIA Shi-xiong, ZHANG Lei, et al. Trajectory Clustering Algorithm Based on Structural Similarity[J]. Journal on Communications, 2011, 32(9): 103-110.
- [13] 郭晨海, 谢俊, 刘军, 等. 连续非线性规划的猴王遗传算法[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2002, 23(4): 87-90.
GUO Chen-hai, XIE Jun, LIU Jun, et al. Monkey King Genetic Algorithm for Continuous Nonlinear Programming[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2002, 23(4): 87-90.