

【工业设计】

基于熵理论的产品美度综合评价方法

张书涛¹, 苏鹏飞¹, 杨文瑾², 苏建宁¹

(1.兰州理工大学 设计艺术学院, 兰州 730050; 2.兰州理工大学 机电工程学院, 兰州 730050)

摘要: **目的** 针对产品设计中的美度评价, 基于熵理论与计算美学理论提出一种产品美度综合评价方法, 实现产品形态布局美度的量化评价。**方法** 根据产品形态特点与形式美学法则, 构建产品形态布局美度指标的量化与计算体系; 应用熵值法计算各美度指标的权重值, 引入相对熵作为均衡系数修正传统线性迭加评价映射方法, 提高评价结果的客观性和准确性, 构建产品美度指标综合评价方法。**结果** 以奥迪A4L系列汽车大灯为例进行实例研究, 通过与市场主流品牌在售产品的形态布局对比研究, 证明了实例研究结果的可信度与方法的可行性。**结论** 基于熵理论的产品美度综合评价方法在产品设计领域具有较强的通用性, 能够为设计师提供客观的美度量化的数据, 在定量层面指导产品形态布局的优化与创新。

关键词: 工业设计; 产品设计; 美度; 计算美学; 熵理论

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)08-0079-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.08.010

Integrated Evaluation Method of Product Aesthetic Based on Entropy Theory

ZHANG Shu-tao¹, SU Peng-fei¹, YANG Wen-jin², SU Jian-ning¹

(1.School of Design Art, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. School of Mechanical & Electromechanical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

ABSTRACT: Focusing on the evaluation of aesthetic in product design, an integrated evaluation method of product aesthetic is proposed to realize the quantitative evaluation of product form layout aesthetics based on the entropy theory and computational aesthetics. The quantitative and calculation system of aesthetic measure of product form layout is constructed by the characteristics of product form and aesthetic principles. The entropy method is applied to calculate the values of the aesthetic measures, and the integrated evaluation method of product aesthetic measure is constructed to improve the objectivity and accuracy of the evaluation result by taking relative entropy as the equilibrium coefficients to modify the traditional method of linear superposition evaluation. Taking the Audi A4L car headlights as an example, the credibility of the case study results and the feasibility of the method are verified by comparing with the product form layout of the leading brands. The integrated evaluation method of product aesthetic based on entropy theory has a high universality in the field of product design, which can provide objective aesthetic measure data for designers and guide the optimization and innovation of product form layout at the quantitative level.

KEY WORDS: industrial design; product design; aesthetic; computational aesthetics; entropy theory

随着人类社会的发展, 产品设计的需求呈现情感化、人性化的发展趋势。人们在满足于产品日益强大的功能的同时, 也逐渐开始从感性的角度考虑产品美学哲理的体现。千百年来, 人类对于美的追求是无止境的, 而“好用的设计同时也会是美的”这一推论也

在设计实践中得到了证实^[1]。美感设计、美度评价作为推动感性设计发展的重要因素, 已逐渐成为设计研究的热点问题。

现代美学一个重要的研究领域是科学美学。自现代美学之父费希纳提出要兴起所谓的“自下而上的美

收稿日期: 2020-12-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51705226)

作者简介: 张书涛(1982—), 男, 山东人, 博士, 兰州理工大学设计艺术学院副教授, 主要从事感性工学、设计认知与智能设计方面的研究。

学”以来,科学美学研究逐渐兴起,并衍生出计算美学、自然主义美学、完形心理学美学等多个美学流派。早在 20 世纪 30 年代,著名数学家 Birkhoff^[2]提出美学量度(Aesthetic Measure)公式,将美度表示为“秩序”(Order)与“复杂度”(Complexity)相除的结果,即 $M=O/C$ 。他虽然没有给出详细的计算方法和验证过程,但是奠定了计算美学的理论基础。如 Ngo 等人^[3]量化了 13 个界面的布局特征,实现界面设计的美度分析;周蕾等人^[4]应用灰色关联分析确定了界面美度指标的权重次序并进行综合评价,通过交互界面美度计算原型系统进行对偶比较实验,验证了评价的有效性;张娜等人^[5]通过层次分析法(AHP)计算多个意象指标的权重,提出了操作界面布局的综合美度计算方法;吕健等人^[6]根据视觉信息的加工过程,结合视觉注意原理构建出信息界面中“布局—认知”的映射关系,提炼出相关美度指标并构建信息界面布局美度评估模型;苏建宁等人^[7]运用潜在语义分析法,通过建立形态美度潜在语义空间对形态美度进行综合评价。然而,目前针对产品形态美度评价的研究存在基础数据来源可靠性较弱、权重计算主观性较强等问题。此外,以传统线性迭加映射关系为基础的美度综合评价方法对审美特征的均衡性考量不足,影响了评价结果的客观性。因此,本研究结合熵理论提出一种产品美度综合评价方法。首先,根据美度量化指标构建系统的产品美度指标综合评价体系。其次,利用信息熵理论获得各指标的权重值,并引入相对熵提升传统线性迭加映射方法的客观性。最后,以奥迪 A4L 系列汽车大灯为例进行实例研究。通过该方法挑选出评分较高的产品,与市场主流品牌在售产品进行分析对比,验证方法的可行性。

1 产品美度与量化

1.1 产品形态美

产品形态是设计师设计思想的外显^[8],是产品功能信息与审美信息的载体。设计师能够利用特有的造型语言,结合形式美学的法则,使产品形态在实现其功能属性的同时,也能传达审美感受,形成产品的形态美。富有美感的产品不仅能体现出企业的文化,还能提高消费者对企业的认知度,从而提升产品的市场竞争力。因此,产品形态美的创造逐渐成为产品设计过程中的重要一环。

以面向对象的观点看待产品形态设计的美学追求,可将其表达为设计对象的美学属性^[9]。在物质产品、精神产品、艺术作品中,美学属性体现出多种特征,如形式的适宜性和完整性、内容的比例性和匀称性、形式与内容的和谐性和一致性等。学者们在文明发展和设计实践过程中,发现这些形式美学法则,并总结出多方面的美度指标,以此来客观地评价产品的美。

1.2 美度指标量化体系

依据形式美学法则,学者们针对一些关键的审美要素提出了相应的美度指标及其计算公式^[10-11]。本研究针对产品形态布局美度进行评价,经专家访谈和设计师聚焦,同时,结合案例产品形态布局特点与形式美学相关理论,选取平衡(平衡度、形心偏移度)、比例(比例度)、节奏(次序度)、协调(整体度、密集度、相似比例度)和统一(共同方向度、简化度)作为美度因素构建量化体系。产品形态布局美度指标见表 1,详细介绍了美度指标的具体释义及其计算公式。

表 1 产品形态布局美度指标
Tab.1 Aesthetic measure of product form layout

美度因素	美度指标	指标解释	计算公式
平衡度	(D_{ph})	各形态元素的面积矩,对垂直和水平中心线两边的产品轮廓线的作用程度	$D_{ph} = 1 - \frac{ D_{phy} + D_{phx} }{2}; D_{phy} = \frac{w_L - w_R}{\max(w_L , w_R)}; D_{phx} = \frac{w_T - w_B}{\max(w_T , w_B)}; w_j = \sum_{i=1}^n a_{ij} \cdot d_{ij}$ 式中: D_{ph} 为平衡度, D_{phy} 、 D_{phx} 分别为垂直、水平平衡度; w 为面积矩; j 为 L、R、T、B, 即左、右、上、下区域; n_j 为 j 区域内元素的数量; a_{ij} 为 j 区域中元素 i 的面积; d_{ij} 为 j 区域中元素 i 的中心到 x 轴或 y 轴的距离
		平衡	
形心偏移度	(D_{py})	产品内各个元素中心关于产品轮廓线的最小外接矩形中心的偏差程度	$D_{py} = 1 - \frac{1}{2} \left[\frac{2 \sum_{i=1}^n a_i (x_i - x_c)}{b_f \sum_{i=1}^n a_i} + \frac{2 \sum_{i=1}^n a_i (y_i - y_c)}{h_f \sum_{i=1}^n a_i} \right]$ 式中: D_{py} 为形心偏移度, 数值越小越好; a_i 为元素 i 的面积; n 为轮廓线内元素的数量; b_f 、 h_f 分别为产品轮廓线的最小外接矩形的宽度和高度; x_c 、 y_c 分别为产品轮廓线的最小外接矩形中心的 x 坐标和 y 坐标; x_i 、 y_i 分别为元素 i 的中心 x 坐标和 y 坐标

续表 1

美度因素	美度指标	指标解释	计算公式
比例	比例度 (D _{bl})	形态元素比例与经典比例 (1/1, 1/1.414, 1/1.618, 1/1.732, 1/2) 的差距。	$D_{bl} = \frac{1}{2} \left\{ \left \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [1 - 2\min(p_j - p_i)] \right + 1 - 2\min(p_j - p_g) \right\};$ $p_i = \min\left(\frac{h_i}{b_i}, \frac{b_i}{h_i}\right); p_g = \min\left(\frac{h_g}{b_g}, \frac{b_g}{h_g}\right)$ 式中：D_{bl} 为比例度，数值越小越好；b_i、h_i 分别为元素 i 的宽度和高度；b_g、h_g 分别为元素群的宽度和高度；p_j 为经典比例。
节奏	次序度 (D _{cx})	产品各形态元素位置布局遵循人眼正常的观察习惯（从左上，经过右上和左下，最后到右下）的程度	$D_{cx} = 1 - \frac{\sum q_j - v_j }{8}; v_j = \begin{cases} 1, w_j = \min \text{ in } w \\ 2, w_j = 3\text{rd in } w \\ 3, w_j = 2\text{nd in } w \\ 4, w_j = \max \text{ in } w \end{cases}; w_j = q_j \sum_{i=1}^{n_j} a_{ij}$ 式中：D_{cx} 为次序度；a_{ij} 为 j 区域中元素 i 的面积；j 为 UL、UR、LL 与 LR，分别为左上、右上、左下与右下 4 个区域；q_j 为 LR、LL、UR 与 UL 4 个区域的权重，分别为 1、2、3、4
	相似比例度 (D _{xs})	元素的宽高比的相似程度	$D_{xs} = \frac{1}{2} \left[\min\left(\frac{h_g/b_g}{h_o/b_o}, \frac{h_o/b_o}{h_g/b_g}\right) + \left \frac{\sum_{i=1}^n \min\left(\frac{h_i/b_i}{h_o/b_o}, \frac{h_o/b_o}{h_i/b_i}\right)}{n} \right \right]$ 式中：D_{xs} 为相似比例度；b_o、h_o 分别为轮廓线的宽度与高度
协调	整体度 (D _{zt})	元素布局的紧凑程度	$D_{zt} = 1 - \frac{a_g - \sum_{i=1}^n a_i}{a_o - \sum_{i=1}^n a_i}$ 式中：D_{zt} 为整体度；a_g 为元素群最小外接矩形的面积；a_o 为轮廓线围成的面积
	密集度 (D _{mj})	轮廓内被形态元素覆盖的程度，即实际覆盖密度与最佳密集度 (50%) 间的差异性	$D_{mj} = 1 - 2 \left 50\% - \left(\sum_{i=1}^n a_i \right) / a_o \right $ 式中：D_{mj} 为密集度，数值越小越好
统一	简化度 (D _{jh})	轮廓线内形态元素进行视觉简化或聚集成组的程度	$D_{jh} = \frac{n_{jhs} - n_{jh}}{n}$ 式中：D_{jh} 为简化度；n_{jh} 为简化集组的组数；n_{jhs} 为简化集组的元素的数量
	共同方向度 (D _{fx})	轮廓线内形态元素由于具有共同方向性而聚集成组程度	$D_{fx} = \frac{n_{fxx} - n_{fx}}{2n}$ 式中：D_{fx} 为共同方向度；n_{fx} 为共同方向集组的组数；n_{fxx} 为具有共同方向的线段数量

2 产品美度指标综合评价体系

作为美度综合评价的影响要素，各美度指标间的权重关系并不确定，本研究采用熵理论中的熵值法计算各美度指标的权重，并在传统线性迭加映射方法的基础上，引入相对熵作为均衡系数进行修正，最终得到较为客观、准确的产品美度综合评价结果，实现对产品形态布局的量化评价。

2.1 基于熵理论的指标权重分析

熵是一个对系统的无序性、不确定性进行度量的数学工具^[12]。随着科学研究的发展和认识实践的不断深入，作为物理学概念的“熵”早已渗透到社会科学的各个领域，涉及信息论、控制论、哲学、经济学等多个学科领域。熵值法属于客观赋权法，它基于信息熵原理，利用各指标值提供的信息量确定指标的权重，弥补了其他权重确定方法主观性较大的缺陷。熵

值法的核心思想是系统中的信息量越大,不确定性就越小,熵值就越小,权重则越大;信息量越小,不确定性就越大,熵值就越大,权重则越小^[13]。

具体实施步骤如下:

依据确立的美度指标量化体系,分解各个样本的形态元素,通过相应的计算公式,获取形态美度指标矩阵 X ,如式(1)所示:

$$X=(x_{ij})_{mn} \quad (1)$$

式中: x_{ij} 为第 i 个样本的第 j 项美度指标的数值。

由于性质的差异,美度指标的计量单位并不统一,所以,需进行标准化处理,将美度指标的绝对数值转化为相对数值,解决同质美度指标的异质化问题。此外,正向指标数值和负向指标数值所代表的评价含义不同,正向指标数值越高越好,而负向指标数值则越低越好。标准化处理美度指标矩阵 X 所包含的正向指标,如式(2)所示:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{mj}\}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{mj}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{mj}\}} \quad (2)$$

标准化处理负向指标,得到 X' , 如示(3)所示:

$$x'_{ij} = \frac{\max\{x_{1j}, \dots, x_{mj}\} - x_{ij}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{mj}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{mj}\}} \quad (3)$$

根据文献^[14],为缩小极端值 0 对评价结果的影响,当 $x'_{ij}=0$ 时,使其约等于 0.001,以保证结果的有效性。标准化处理后的数据 x'_{ij} 仍记为 x_{ij} ,则第 j 项美度指标的第 i 个样本值占该项指标的比重为 p_{ij} ,如式(4)所示:

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}, i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n \quad (4)$$

计算第 j 项美度指标的熵值,如式(5)所示:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln(p_{ij}), j=1,2,\dots,n \quad (5)$$

其中, $k=1/\ln(m)>0$, 满足 $e_j \geq 0$ 。则各项美度指标的权重 w_j , 如式(6)所示:

$$w_j = \frac{1-e_j}{\sum_{j=1}^n 1-e_j}, j=1,2,\dots,n \quad (6)$$

由此计算可得美度指标的权重矩阵 W 。

2.2 基于相对熵的均衡性评价

相对熵用于衡量两个取值为正的函数或概率分布之间的差异^[15]。特别地,在信息论中,相对熵表示应用概率分布 Q 拟合真实分布 P 时所产生的信息损耗,其中 P 表示真实分布, Q 表示 P 的拟合分布。传统的线性加权迭加映射方法是从输入向量的总体效能角度进行综合评价,评价过程还需考虑各输入向量内部隐含的性能协调性和均衡性。孙棣华等人^[16]根据熵与相对熵的定义和性质,应用相对熵作为均衡性定

量描述的指标,建立了属性指标的均衡评价映射模型,并通过算例验证了该模型的有效性。

相对熵源自熵的定义和性质^[17]。

可加性:系统的熵等于其中各状态熵的总和。

非负性:根据概率的性质, $P_i \in [0,1]$ ($i=1,2,\dots,m$), 系统的熵是非负的。

极值性:当系统的状态概率为等概率, $P_i=1/m$ ($i=1,2,\dots,m$) 时,其熵达到最大,即 $S(P_1, P_2, \dots, P_m) \leq S\left(\frac{1}{m}, \frac{1}{m}, \dots, \frac{1}{m}\right) = \ln(m)$ 。

状态编号性:系统熵的大小与其状态发生概率 P_i 的排列次序无关。

根据熵的极值性可知,当输入向量的各分量完全相等时,熵取到最大值 $S_{\max}=\ln(m)$,定义相对熵,如式(7)所示:

$$S_x = \frac{S_{\max} - S}{S_{\max}} \quad (7)$$

根据熵的性质可知, $S_x \in [0,1]$ 。 S_x 越小,输入向量的各分量就越接近,输入向量就越均衡,因此,选择相对熵 S_x 作为对均衡性进行量化的系数是合理的。相对熵的计算步骤如下。

对美度指标矩阵 X 进行标准化处理,得到第 i 个样本的第 j 项美度指标值占该样本美度指标的比重 p'_{ij} ,如式(8)所示:

$$p'_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^n x_{ij}}, i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n \quad (8)$$

计算第 i 个样本的熵值,如式(9)所示:

$$S_i = -\sum_{j=1}^n p'_{ij} \ln(p'_{ij}), j=1,2,\dots,n \quad (9)$$

当样本的各项美度指标的比重完全相等时,熵值取到最大值为 $S_{i\max}=\ln(n)$ 。根据式(7)计算出第 i 个样本的相对熵,如式(10)所示:

$$S_{xi} = \frac{S_{i\max} - S_i}{S_{i\max}}, i=1,\dots,m \quad (10)$$

利用相对熵作为均衡系数修正原有的线性迭加评价映射方法,提出基于相对熵的均衡性评价映射方法,如式(11)所示:

$$y_i = (1 - S_{xi})WX' \quad (11)$$

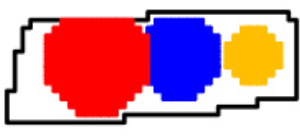
其中: y_i 为第 i 个样本的综合评价, X' 为标准化处理后的美度指标矩阵, W 为美度指标的权重矩阵, S_{xi} 为样本的相对熵。由此,得到产品美度指标综合评价的结果。

3 实例研究

3.1 确定研究对象

本研究以奥迪 A4L 系列汽车大灯为例展开研究。

表 2 奥迪 A4L 系列汽车大灯
Tab.2 Headlights of Audi A4L

序号	年代	图片	网格化图
样本 1	2001		
样本 2	2006		
样本 3	2009		
样本 4	2010		
样本 5	2013		
样本 6	2017		
样本 7	2019		

奥迪 A4L 系列目前已上市七代产品，收集大灯图片并进行网格化处理，用不同颜色区分大灯的形态元素，便于后期美度指标的测量与计算，奥迪 A4L 系列汽车大灯见表 2。

3.2 汽车大灯形态数据测量与美度计算

根据前期选取的 9 个美度指标，绘制汽车大灯形态参数测量坐标系，美度指标计算坐标系见图 1。坐标系的原点 O 为大灯轮廓线的中心，十字交叉点 o 为各形态元素的中心，大小两个矩形分别为产品轮廓线最小外接矩形和元素群最小外接矩形，并定义其宽度和高度为 b_f 、 h_f 和 b_g 、 h_g 。

利用形态分析软件 Rhinoceros 测绘相关美度因素数据，对各美度指标值进行计算。以样本 1 的平衡度计算为例。样本 1 包含有 3 个元素，从左到右编号为元素 1、元素 2、元素 3。软件测量得到的美度指标测量数据（以样本 1 的平衡度为例）见表 3。

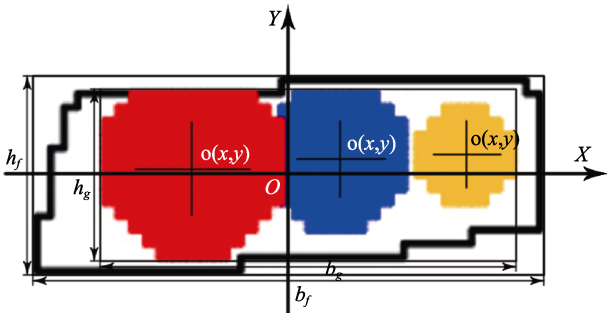


图 1 美度指标计算坐标系
Fig.1 Coordinate system of aesthetic measure

将表 3 测量数据代入表 1 中的平衡度指标计算公式，得到样本 1 的垂直平衡度为 0.941，水平平衡度为 0.796，平衡度为 0.132。依照表 1 公式，计算样本 1 的其余美度指标；其他样本的美度指标计算参照样本 1 进行。

经计算得到 7 个汽车大灯样本的简化度均为

0.333, 因此, 在美学指标量化体系中不再考虑简化度。计算其余 8 项指标得到形态美学指标矩阵 X , 形态美学指标矩阵见表 4。

3.3 美学指标综合评价

根据公式对形态美学指标矩阵 X 进行标准化处

理。根据含义可知, 形心偏移度、比例度和密集度为负向指标, 将指标值代入式(3)进行标准化处理; 其余指标为正向指标, 代入式(2)进行标准化处理。计算结果构成标准化矩阵 X' , 标准化矩阵见表 5。

将表 5 标准化数据代入式(4), 得到各美学指标的样本比重值, 见表 6。

表 3 美学指标测量数据 (以样本 1 的平衡度为例)
Tab.3 Measurement data of aesthetic measure (taking the balance of sample 1 as an example)

	左区域 面积	左区域形心 到 Y 轴距离	右区域 面积	右区域形心 到 Y 轴距离	上区域 面积	上区域形心 到 X 轴距离	下区域 面积	下区域形心 到 X 轴距离
元素 1	130.000	7.042	0	0	70.201	2.752	59.799	2.544
元素 2	3.797	0.271	73.203	3.958	48.754	2.752	28.246	1.746
元素 3	0	0	37.000	12.958	28.031	2.089	8.969	0.911

表 4 形态美学指标矩阵
Tab.4 Matrix of form aesthetic measure

	样本 1	样本 2	样本 3	样本 4	样本 5	样本 6	样本 7
平衡度 (D_{ph})	0.132	0.064	0.552	0.511	0.451	0.518	0.410
形心偏移度 (D_{py})	0.924	0.848	0.968	0.987	0.866	0.870	0.813
比例度 (D_{bl})	0.841	0.828	0.756	0.675	0.570	0.543	0.672
次序感 (D_{cx})	1.000	0.750	0.500	1.000	1.000	1.000	1.000
相似比例度 (D_{xs})	0.661	0.691	0.804	0.707	0.742	0.601	0.845
整体度 (D_{zt})	0.431	0.624	0.339	0.858	0.270	0.631	0.815
密集度 (D_{mj})	0.911	0.866	0.919	0.922	0.954	0.931	0.850
共同方向度 (D_{fx})	0	0	0.333	0.333	0.333	0.167	0.400

表 5 标准化矩阵
Tab.5 Normalized matrix

	样本 1	样本 2	样本 3	样本 4	样本 5	样本 6	样本 7
平衡度	0.139	0.001	1.000	0.916	0.793	0.930	0.709
形心偏移度	0.362	0.799	0.109	0.001	0.695	0.672	1.000
比例度	0.001	0.044	0.285	0.557	0.909	1.000	0.567
次序感	1.000	0.500	0.001	1.000	1.000	1.000	1.000
相似比例度	0.246	0.369	0.832	0.434	0.578	0.001	1.000
整体度	0.274	0.602	0.117	1.000	0.001	0.614	0.927
密集度	0.413	0.846	0.337	0.308	0.001	0.221	1.000
共同方向度	0.001	0.001	0.833	0.833	0.833	0.418	1.000

表 6 样本比重值
Tab.6 Sample proportion values

	样本 1	样本 2	样本 3	样本 4	样本 5	样本 6	样本 7
平衡度	0.031	0.001	0.223	0.204	0.177	0.207	0.158
形心偏移度	0.100	0.220	0.030	0.001	0.191	0.185	0.275
比例度	0.001	0.013	0.085	0.166	0.270	0.297	0.169
次序感	0.182	0.091	0.001	0.182	0.182	0.182	0.182
相似比例度	0.071	0.107	0.241	0.126	0.167	0.001	0.289
整体度	0.077	0.170	0.033	0.283	0.001	0.174	0.262
密集度	0.132	0.271	0.108	0.098	0.001	0.071	0.320
共同方向度	0.001	0.001	0.213	0.213	0.213	0.107	0.255

表 7 熵值与权重
Tab.7 Entropy values & weights

	平衡度	形心偏移度	比例度	次序感	相似比例度	整体度	密集度	共同方向度
熵值	0.872	0.852	0.814	0.912	0.871	0.839	0.847	0.816
权重	0.109	0.126	0.158	0.075	0.110	0.137	0.130	0.156

表 8 美度指标比重值
Tab.8 Proportions of aesthetic measures

	样本 1	样本 2	样本 3	样本 4	样本 5	样本 6	样本 7
平衡度	0.027	0.014	0.107	0.085	0.087	0.098	0.071
形心偏移度	0.189	0.182	0.187	0.165	0.167	0.165	0.140
比例度	0.172	0.177	0.146	0.113	0.110	0.103	0.116
次序感	0.204	0.161	0.097	0.167	0.193	0.190	0.172
相似比例度	0.135	0.148	0.155	0.118	0.143	0.114	0.146
整体度	0.088	0.134	0.066	0.143	0.052	0.120	0.140
密集度	0.186	0.185	0.178	0.154	0.184	0.177	0.146
共同方向度	0.001	0.001	0.064	0.056	0.064	0.032	0.069

表 9 相对熵值与美度综合评价结果
Tab.9 Relative entropy values & integrated evaluations of aesthetic

	样本 1	样本 2	样本 3	样本 4	样本 5	样本 6	样本 7
相对熵值	1.843	1.840	2.011	2.031	1.991	1.994	2.037
综合评价	0.225	0.334	0.434	0.602	0.560	0.572	0.872

将表 6 比重值数据代入式(5)，并将熵值结果代入式(6)，分别得到各项美度指标的熵值与权重矩阵 W ，熵值与权重见表 7。

计算样本的相对熵。将美度指标矩阵 X （如表 4）代入式(8)进行纵向标准化处理，得到各样本的美度指标的比重值，见表 8。

将表 8 比重数据代入式(9)，得到各样本的熵值。当各美度指标的比重完全相等时，熵取最大值为 $S_{\max}=\ln(8)$ ，根据式(10)计算出各样本的相对熵。将标准化矩阵 X' 、美度指标的权重矩阵 W 以及各样本的相对熵数据代入式(11)，得到奥迪 A4L 系列汽车大灯的美度综合评价结果，相对熵值与美度综合评价结果见表 9。

4 评价结果验证与讨论

由综合评价结果可知，奥迪 A4L 系列汽车大灯第七代（样本 7）的评分最高，第四代（样本 4）的评分次之，因此，选取这两代产品作为代表样本分析其形态布局。此外，选取与奥迪 A4L 系列同等价位、同等款式、同等品牌知名度的宝马 3 系（2019 款、2020 款）、梅赛德斯奔驰 C 级（2019 款、2020 款）和大众迈腾（2019 款）作为对比样本，对产品的大灯形态布局进行对比分析，验证美度评价结果的合理性。

首先，对产品样本的图片进行灰度处理，减小颜

色、材质对大灯形态布局的影响。其次，对图片进行网格化处理，并对大灯内部形态元素进行颜色标记，以突出元素的形态和边界。为方便对大灯内部元素布局的研究，将产品的外轮廓线全部抽象为大小相同的矩形，根据内部元素的大小、位置对矩形进行划分，实现产品布局表现的统一，并对产品中个性化特征较强的转向灯和日行灯位置进行单独说明。主流汽车大灯形态布局对比见表 10。

根据对比结果，2010 款奥迪 A4L 大灯主光源区远近光灯形态布局采用左右分布的方式，辅光源区转向灯、日行灯与大灯的下边缘处贴合，主光源区与辅光源区呈现上下分布的特点。2019 款奥迪 A4L 大灯主光源区远近光灯形态布局与 2010 款大体一致，辅光源区由于光源数量的增加，转向灯、日行灯大部分与大灯的上下边缘处贴合，并在拐角处有所延伸，主光源区与辅光源区呈现上中下分布的特点。从美度指标综合评价的角度来看，两者高权重指标（比例度、共同方向度）的评分较高，这得益于其较为规整的形态布局以及对元素形态比例的考量。两款大灯的元素形态比例和元素群形态比例，均接近经典比例。而在共同方向度方面，两款大灯的主光源区与辅光源区呈现出一致的方向趋势，特别是 2019 款大灯的远近光灯均采用矩形设计，与转向灯和日行灯的拐角形成相同的方向趋势，进一步提升了共同方向度。

对比样本中的宝马 3 系两款大灯的主光源区形

表 10 主流汽车大灯形态布局对比
Tab.10 Comparison between headlight form layouts of leading brands

	奥迪 A4L	奥迪 A4L	宝马 3 系	宝马 3 系	奔驰 C 级	奔驰 C 级	大众迈腾
年代	2010	2019	2019	2020	2019	2020	2019
图片							
网格化图							
布局图							
转向灯和日行灯位置	下边缘	上下边缘	上边缘	上下边缘	上边缘	上边缘	下边缘

态布局与 2010 款奥迪 A4L 一致，主光源区与辅光源区同样呈现上下分布的特点，并且将辅光源区的转向灯、日行灯与大灯的上边缘处贴合，并在 2020 款大灯的下边缘增加了两段日行灯光带，方向趋势与主光源区保持一致，从而提升产品的共同方向度。奔驰 C 级两款大灯的设计形态布局与 2019 款奥迪 A4L 相近，特别是辅光源区采用贴合大灯上边缘的弯曲处理，与主光源区的菱形形态构成向右上的方向统一。主光源区远近光灯的布局，也是采用左右分布的方式，但在光源数量上有所差异。大众迈腾主光源区形态布局及其主辅光源区布局与 2010 款奥迪 A4L 整体保持一致，虽然其转向灯和日行灯的工作部分采用分开形式，但是依旧采用贴合在一起附于大灯下边缘的布局形式。

综上所述，3 个品牌多款在售汽车大灯形态布局的分析结果与美度评分较高的两代奥迪 A4L 汽车大灯的形态布局具有较高的相似性，说明评分较高的大灯符合市场的审美要求以及主流品牌中型车大灯的美感趋势，验证了美度综合评价方法对产品形态布局美度量化的合理性和市场认可性，为设计师进行新产品的研发提供了有效的帮助。

5 结语

本研究应用产品美感外显化的技术方法，对关键美度指标进行量化分析，并根据熵理论和相对熵原理构建产品美度综合评价体系。以奥迪 A4L 系列汽车大灯为例，通过对美度综合评分较高产品与市场主流品牌产品形态布局相似性的对比，验证了方法的有效性。主要结论如下：（1）基于形式美学法则和计算美学的相关理论，构建产品美度指标量化体系，实现产品形态布局的美度量化分析，为综合评价体系的建立奠定基础；（2）依据熵理论和相对熵的均衡性属性，构建产品美度指标综合评价方法，提升评价结果的客观性；（3）该方法在产品形态布局的美度评价方面具有较强的通用性，设计师能够根据评价方法从美感角

度对产品方案进行筛选。此外，评价体系中的美度指标值及其权值对后续方案的改进具有一定的参考价值，提高了优化设计的效率。

参考文献：

[1] BEN-BASSAT T, MEYER J, TRACTINSKY N. Economic and Subjective Measures of the Perceived Value of Aesthetics and Usability[J]. ACM Transactions on Computer-Human Interaction, 2006, 13(2): 210-234.

[2] BIRKHOFF G D. Aesthetic measure[M]. Cambridge: Harvard University Press, 1933.

[3] NGO D C L, LIAN S T, BYRNE J G. Modelling Interface Aesthetics[J]. Information Sciences, 2003, 152(8): 25-46.

[4] 周蕾, 薛澄岐, 汤文成, 等. 界面元素布局设计的美度评价方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(5): 758-766.

ZHOU Lei, XUE Cheng-qi, TANG Wen-cheng, et al. Aesthetic Evaluation Method of Interface Elements Layout Design[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2013, 25(5): 758-766.

[5] 张娜, 王家民, 杨延璞. 人机界面形态元素布局设计美度意象的评价方法[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(10): 1594-1598.

ZHANG Na, WANG Jia-min, YANG Yan-pu. Evaluation Method of Aesthetic Image for Man-machine Interface Form Elements Layout Design[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(10): 1594-1598.

[6] 吕健, 孙玮伯, 潘伟杰, 等. 基于认知特性的信息界面布局美度评价[J]. 包装工程, 2019, 40(18): 220-226.

LYU Jian, SUN Wei-bo, PAN Wei-jie, et al. Evaluation of Information Interface Layout Beauty Based on Cognitive Characteristics[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(18): 220-226.

[7] 苏建宁, 杨文瑾, 张书涛, 等. 基于潜在语义分析的形态美度综合评价方法[J]. 兰州理工大学学报, 2018, 44(6): 39-43.

- SU Jian-ning, YANG Wen-jin, ZHANG Shu-tao, et al. Comprehensive Evaluation Method of Aesthetic Degree Based on Latent Semantic Analysis[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2018, 44(6): 39-43.
- [8] 张书涛, 苏建宁, 胡赤兵, 等. 基于广义遗传算法的设计师认知思维模型[J]. 兰州理工大学学报, 2014, 40(4): 36-39.
- ZHANG Shu-tao, SU Jian-ning, HU Chi-bing, et al. Cognitive Thinking Model of Designer Based on Generalized Genetic Algorithm[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2014, 40(4): 36-39.
- [9] 朱毅, 赵江洪. 造型的美学属性及其多向性研究[J]. 包装工程, 2014, 35(18): 25-29.
- ZHU Yi, ZHAO Jiang-hong. The Aesthetic Properties and Pleiotropy of Automobile-modeling Design[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(18): 25-29.
- [10] 周蕾, 薛澄岐, 汤文成, 等. 产品信息界面的用户感性预测模型[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(3): 544-554.
- ZHOU Lei, XUE Cheng-qi, TANG Wen-cheng, et al. Aesthetic Evaluation Method of Interface Elements Layout Design[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(3): 544-554.
- [11] 周爱民, 苏建宁, 阎树田, 等. 产品形态审美综合评价的非线性信息动力学模型[J]. 机械工程学报, 2018, 54(15): 150-159.
- ZHOU Ai-min, SU Jian-ning, YAN Shu-tian, et al. Nonlinear Information Dynamics Model of Synthetic Evaluation on Product Form Aesthetic[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(15): 150-159.
- [12] 金杨, 刘真, 邬旭杰. 印刷复制过程图像信息熵传递分析[J]. 包装工程, 2012, 33(23): 133-136.
- JIN Yang, LIU Zhen, WU Xu-jie. Analysis on Information Entropy Transmission of Image in Printing Process[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(23): 133-136.
- [13] 王生昌, 付迪, 陈娟娟, 等. 基于熵值法的汽车动力性能主观评价指标权重确定方法[J]. 公路交通科技, 2015, 32(7): 153-158.
- WANG Sheng-chang, FU Di, CHEN Juan-juan, et al. Determination of Weights of Subjective Evaluation Indexes of Automobile Dynamic Performance Based on Entropy Method[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(7): 153-158.
- [14] 李娜, 高雷阜, 王磊. 基于相对熵的区间 Pythagorean 模糊多属性 AQM 决策方法及其应用[J]. 运筹与管理, 2019, 28(1): 79-85.
- LI Na, GAO Lei-fu, WANG Lei. AQM Method with Interval-Valued Pythagorean Fuzzy Information Based on Relative Entropy and Its Application[J]. Operations Research and Management Science, 2019, 28(1): 79-85.
- [15] 薛建辉. 基于差图熵的图像质量评价方法[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.
- XUE Jian-hui. Research on Image Quality Assessment Based on the Entropy of the Differential Image[D]. Xi'an: Xidian University, 2015.
- [16] 孙棣华, 刘卫宁, 宋伟. 基于相对熵的决策属性均衡性评价模型[J]. 系统工程理论与实践, 2001(6): 83-85.
- SUN Di-hua, LIU Wei-ning, SONG Wei. A Model with the Evaluation of the Equilibrium of Attribute Indexes Based on the Relative Entropy Measuring[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2001(6): 83-85.
- [17] 苏建宁, 张新新, 景楠, 等. 认知差异下的产品造型意象熵评价研究[J]. 机械设计, 2016, 33(3): 105-108.
- SU Jian-ning, ZHANG Xin-xin, JING Nan, et al. Research on the Entropy Evaluation of Product Styling Image Under the Cognitive Difference[J]. Journal of Machine Design, 2016, 33(3): 105-108.