

基于指标适度标准化的界面风格美综合评价模型

周爱民, 周彩霞, 欧阳晋焱, 张书涛

(兰州理工大学设计艺术学院, 甘肃兰州 730050)

摘要: 为了客观、定量地评价界面布局的美度, 从设计风格的角度, 提出非线性审美综合评价模型. 以“活泼美”为例, 基于已提出的美度指标体系, 针对各美度指标的形式特征设计各组实验样本, 计算各样本美度指标值, 运用李克特量表法对“活泼美”进行调查评分; 运用最小二乘法将各美度指标值与“活泼美”调查值进行曲线拟合, 得出关系表达式, 实现美度指标适度标准化; 运用逼近理想解排序法和相关性定权法, 建立界面布局“活泼美”的综合评价模型. 对 10 个界面样本进行实例研究, 运用心理物理学中的两极递进式排序法对模型进行验证分析. 结果表明, 模型具有良好的精度, 可以作为界面智能设计系统的适应度评价函数, 为界面智能设计的发展提供可靠的技术支撑.

关键词: 界面设计; 美度; 风格美; 指标适度标准化; 综合评价

中图分类号: TH 166; TB 472 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-973X(2020)11-0001-13

Model of synthetic evaluation on interface stylistic beauty based on moderately standardized of index

ZHOU Ai-min, ZHOU Cai-xia, OUYANG Jin-yan, ZHANG Shu-tao

(School of Design Art, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: A nonlinear model of aesthetic synthetic evaluation was proposed for objectively and quantitatively evaluating the interface layout aesthetics from the perspective of design style. Taking “lively beauty” as an example, experimental sample groups were designed according to the formal characteristics of aesthetic measure indexes, the aesthetic measure index values of each sample were calculated, based on the aesthetic measure index system proposed. The “lively beauty” was investigated and scored by Likert scale method, the aesthetic measure index values and the “lively beauty” survey values were curve-fitted by least square method, and a relation expression derived from the curve fitting moderately standardized the aesthetic measure indexes. Technique for order preference by similarity to ideal solution and criteria importance through intercriteria correlation method were used to establish a synthetic evaluation model of “lively beauty” of interface layout. Ten interface samples were analyzed, and the model was validated and analyzed by the bipolar progressive sorting method of psychophysics. Results show that the model has good accuracy. The model can be used as the fitness function of the interface intelligent design system, and provide reliable technical support for the development interface intelligent design.

Key words: interface design; aesthetic measure; stylistic beauty; moderate standardized of index; synthetic evaluation

界面智能设计可以生成许多新颖的、富有灵感的设计方案^[1], 逐渐成为设计研究的热点. 研究表明, 美在塑造用户感知方面起着重要作用.

美观的界面布局能够提高用户的使用效率, 降低界面感知的复杂性, 有助于提高系统的可用性、有效性和可接受性^[2]. 界面布局审美评价是考察

收稿日期: 2019-10-08.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51705226); 甘肃省自然科学基金资助项目(2017gs10786).

作者简介: 周爱民(1978—), 男, 副教授, 从事产品形态智能设计研究. orcid.org/0000-0002-3994-9040. E-mail: 51289547@qq.com

通信联系人: 张书涛, 男, 副教授. orcid.org/0000-0003-4665-5443. E-mail: 364725955@qq.com

界面设计质量、指导界面设计的重要手段。审美评价模型作为适应度函数,有利于界面智能设计系统选出美度更高的方案。

1933年,计算美学的奠基人 Birkhoff 提出了宏观美感的数学表达式:将“美度”(aesthetic measure)表示为“秩序”(order)除以“复杂度”(complexity)的商。计算美学采取科学的、自然主义的研究方式,运用数学计算方法将审美评价建立在经过验证的知识和合理推论的基础之上。此后许多学者开展计算美学的研究,如:Balinsky^[3]提出界面对称度指标的计算方法与界面对称形态的自动检测方法,并证明对称在界面审美中的重要性。Zhou等^[4]提出了界面的平衡度指标的计算方法,并构建布局调整、属性选择、方案优化3个优化模型。Lai等^[5]运用美度计算与调查实验的方法建立平衡度、对称度与文本图像的美度之间的关系模型。Bauerly等^[6]通过改变元素的对称性和元素的数量2个变量,探讨其对界面审美评价的影响。Valencia等^[7]根据格式塔中的对称性、平行性和连续性3个原则,构建3个美度指标的计算方法,并证明了其适用性。Maity等^[8]对界面中的元素的位置与色彩2个方面的美学特征进行美度计算,运用支持向量机方法提出了一种预测界面美度的计算模型。Hsiao等^[9]基于格式塔的视觉组织理论,运用模糊信息熵方法对网页进行审美认知计算。Ngo等^[10]针对界面设计中的13个布局要素建立对应的美度指标计算公式,实现界面布局特征的量化。周蕾等^[11]运用灰色关联理论对界面设计的13个指标的美度进行综合评价。周爱民等^[12]针对汽车前脸设计特征构建产品形态美度指标系统,运用信息动力学的最大流原理确定各美度指标的权值,实现对产品形态美度的综合评价。

目前基于计算美学方法的审美评价研究,存在2方面的问题需要深入分析与研究。一方面传统的审美综合评价采用一种笼统的评价方式,即求得综合的美度,这种评价方式难以获得理想的结果,与现实需求存在一定差距。美有各种风格类型,风格美具有丰富性、独创性,能够使审美主体形成不同的审美观照与审美体验,满足人们的各种审美需求^[13]。传统研究中对风格不加区分,将美度指标直接进行比较、评价的做法并不符合人们的审美思维方式与审美认知经验,难以得到合理解释。在设计中,通常需要根据用户的审美需求、审美意志、审美期待和审美趣味等进行目标

用户群体细分,从而明确目标风格定位,指明设计方向^[14]。如果将设计目标笼统的定位为设计美的界面,设计工作将难以开展,也很难得到理想的设计结果。因此,针对具体的风格进行审美评价研究,既是实际所需,也能提高评价的精度。

另一方面,在审美综合评价中,美度指标存在适度标准化问题。从统计学角度来看,统计指标分为正指标、逆指标和适度指标。正指标是数值越大越好的指标,逆指标是数值越小越好的指标。适度指标则是数值既不应过大,也不应过小,而应趋于1个或多个适度点的指标^[15]。目前的研究通常将美度指标视为正向指标,这样的处理方式将复杂问题过于简单化,与实际情况存在较大差距,比如,平衡度不一定是越高越好,对于“活泼美”“动感美”等风格而言,肯定不是越高越美,但也不一定是越低越美,而可能是处于中间的1个或多个点的时候最美,这其中存在着复杂的非线性关系。因此,对于不同的审美风格,各美度指标会表现出不同的适应程度,即美度指标应该是适度指标,需要将其进行适度标准化处理,才能更加准确地用于审美评价。

本研究采用分类学的思想,就某一种具体的风格进行审美评价研究。以人们比较熟悉的“活泼美”作为评价目标,便于被试理解实验要求,提高评价结果的准确度。基于文献[10]的美度指标体系,在“活泼美”的形式特征中选择指标作为“活泼美”的基本评价标准。根据各美度指标的形式特征设计各组实验的样本,计算其美度值,并通过调查实验得到“活泼美”评分;运用曲线拟合方法进行指标适度标准化,求解“活泼美”与美度指标的关系表达式;建立界面布局“活泼美”的综合评价模型,并进行验证。

1 基于风格美的美度指标适度标准化实验

1.1 指标选择

Ngo等提出的界面布局中13个美度指标为:平衡度、均衡度、对称度、次序度、整体度、规则度、密集度、重复度、相似比例度、节奏度、比例度、均匀度、简单度。其中平衡度、均衡度、对称度的定义相近,均为衡量界面平衡的指标,周蕾等^[11]将其归结为平衡性指标,实例计算表明三者的相关系数非常高,存在较高的重复信息,因此将其

归纳为平衡度指标进行考量;规则度和简单度均为衡量界面规则性与对齐性的指标,存在重复信息,周爱民等^[12]将二者综合.此外,Tullis^[16]已经证明密集度的面积占比在0.5左右时最优,Marcus^[17]提出比例度是多峰函数,因此密集度与比例度按照此2篇文献的方法进行适度标准化.按照界面布局的“活泼风格”,对8个美度指标分别进行适度标准化实验,即:平衡度、规则度、整体度、重复度、相似比例度、次序度、均匀度、节奏度.

1.2 样本设计

实验目的:考察8个美度指标对“活泼美”的影响.

样本设计原则:准确反映各美度指标对风格美的影响,针对某个指标进行实验时,应尽量避免其他美度指标的影响.

呈现形式:基于认知心理学中形状认知加工的优势效应,从界面布局特征出发,对样本设计元素进行功能分区和抽象表征,将功能分区抽象为能够包含内部元素的最小矩形,实现设计元素在整体界面中的空间定位^[11].建立界面布局美度指标计算坐标系,如图1所示.图中,坐标原点O为界面的中心, b_{ij} 为第j个区域中的第i个元素, c_{ij} 为元素 b_{ij} 的形心, x_{ij} 、 y_{ij} 分别为 c_{ij} 的x、y坐标, w_{ij} 、 h_{ij} 分别为 b_{ij} 的宽、高.由于样本大小变化不会影响审美评价的结果,为了方便计算,实验中界面样本的边框宽度与高度均取统一值,即边长为160 mm的正方形,元素以黑色正方形或矩形表示.

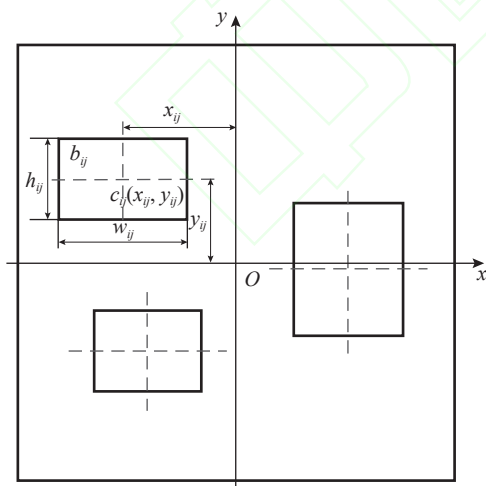


图1 美度指标计算坐标图

Fig.1 Coordinate map of aesthetic measure indexes calculating

1.2.1 平衡度 平衡指界面整体视觉信息量的平衡程度和稳定感,是表征界面元素的面积及其分布合理性的指标.平衡的形态可以使人产生稳定、平静的心理感受,不平衡形态会形成一定的动态

感.平衡度的公式^[10]为

$$B^1 = 1 - \frac{|B_y^1| + |B_x^1|}{2}, \quad (1)$$

$$B_y^1 = \frac{w_L - w_R}{\max(|w_L|, |w_R|)}, \quad (2)$$

$$w_j = \sum_{i=1}^n a_{ij} d_{ij}. \quad (3)$$

式中: B^1 为平衡度; B_y^1 、 B_x^1 (同理可得,略)分别为垂直、水平平衡度; w_L 、 w_R 为y轴左、右边的面积矩; j 为L、R,分别为左、右区域; a_{ij} 为元素 b_{ij} 的面积; d_{ij} 为形心 c_{ij} 到y轴的距离; n 为界面中元素的数量.

由式(1)~(3)可知,影响界面平衡度值的因素为元素的面积和元素中心距离界面y、x轴的距离.如图2所示,实验中将平衡度变化分为3种情况讨论,共生成36个样本:1)垂直平衡度不变、水平平衡度改变;2)水平平衡度不变、垂直平衡度改变;3)垂直和水平平衡度均改变.第1种情况(样本1~9)的样本设计为:设界面左侧元素不变,面积为625 mm²的正方形,中心距y轴的距离为30 mm;右侧正方形的面积和中心距y轴的距离从左至右分9级依次递减,数量变化情况如表1所示.第2种(样本10~18)与第1种样本设计方法相同,略.第3种样本设计分为2种类型:第1类(样本19~27)是:左侧正方形边长25 mm,中心距离x、y轴均为30 mm;右侧正方形面积和中心距x、y轴的距离从左至右分9级依次递减,数量变化情况如表1所示.第2类(样本28~36)是:左侧正方形边长为25 mm,中心距离y轴50 mm,距离x轴30 mm;右侧正方形面积从左至右分9级依次递减,中心到y轴距离依次递增,到x轴距离依次递减,数量变化情况如表1所示.

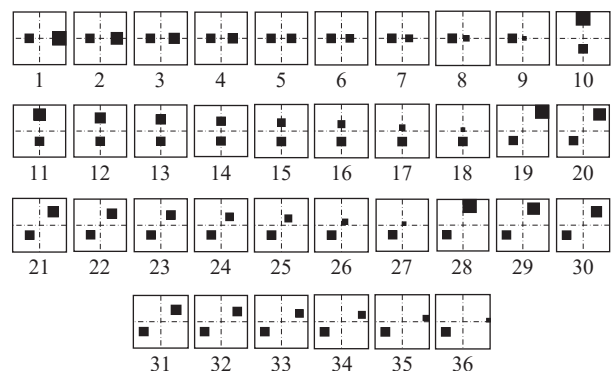


图2 平衡度样本

Fig.2 Samples of balance

表 1 平衡度各变化样本的面积和中心一轴距离

Tab.1 Area and center-axis separation of each variable sample in balance

样本 序号	面积/ mm ²	距y轴/ mm	距x轴/ mm	样本 序号	面积/ mm ²	距y轴/ mm	距x轴/ mm
1	1 600	60	0	19	1 600	60	60
2	1 225	50	0	20	1 225	50	50
3	900	40	0	21	900	40	40
4	756.25	35	0	22	756.25	35	35
5	625	30	0	23	625	30	30
6	506.25	25	0	24	506.25	25	25
7	400	20	0	25	400	20	20
8	225	10	0	26	225	10	10
9	100	5	0	27	100	5	5
10	1 600	0	60	28	1 600	20	60
11	1 225	0	50	29	1 225	30	50
12	900	0	40	30	900	40	40
13	756.25	0	35	31	756.25	45	35
14	625	0	30	32	625	50	30
15	506.25	0	25	33	506.25	55	25
16	400	0	20	34	400	60	20
17	225	0	10	35	225	70	10
18	100	0	5	36	100	75	5

1.2.2 整体度 整体度是衡量界面元素布局的紧凑程度,整体度越高,形态的完整性越好,复杂性越低,越容易识别,形态越协调.由整体度公式^[10]可知,其影响因素为元素群最小外接矩形的面积、元素的面积和以及界面面积.实验的样本设计为界面边框的宽高不变,为避免其他因素影响,界面元素为4个相同元素,各象限均为1个,面积均为400 mm²的正方形.只改变其外接矩形面积来改变整体度,外接矩形边长从左至右分13级依次等差递减,分别为160, 150, ..., 40 mm,共生成13个样本,如图3所示.

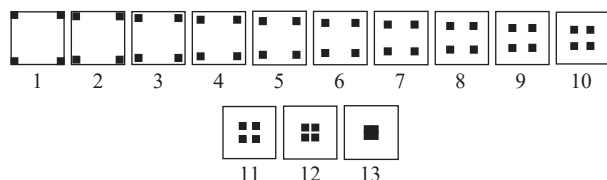


图 3 整体度样本

Fig.3 Samples of unity

1.2.3 规则度 规则度为元素的对齐程度,包括元素的左、右、上、下的对齐程度,规则度越高,形态越整齐.由规则度公式^[10]可知,影响因素为界面元素水平方向和垂直方向对齐的数量.实验的样本设计为界面元素为4个相同的元素,面积均为400 mm²,则水平和垂直方向均有5种对齐情况,对齐数为0、1、2、3、4;因此可以形成5×5=25个规则度变化的样本.如图4所示,样本1~5为垂直方向对齐数为0,水平对齐数从0~4依次增加;样本6~10垂直对齐为1,水平对齐数从0~4依次增加;以此类推.

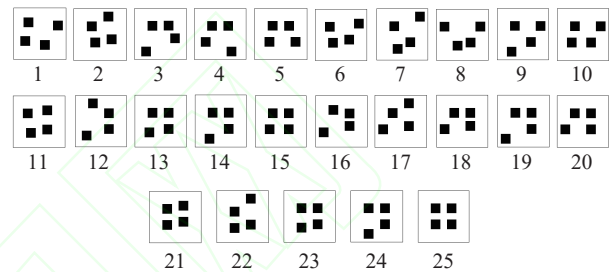


图 4 规则度样本

Fig.4 Samples of regularity

1.2.4 重复度 重复度是衡量元素重复使用程度,重复度高的布局给人以整齐、规律、单纯的美感.由重复度公式^[10]可知,其影响因素为不同尺寸的元素数量.实验的样本设计为界面元素为9个,按照3行3列排列,元素的行与列均为中心对齐排列,间距相同,元素尺寸数量从左到右依次从1增加到9,共生成9个样本,如图5所示.

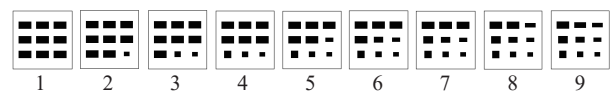


图 5 重复度样本

Fig.5 Samples of repeatability

1.2.5 相似比例度 相似比例度是衡量元素的宽高比的相似程度,相似度越高,表明元素长宽比越接近,形态具有良好的协调性.反之,表明元素长宽比相差较大,形成明显的对比,形态具有较强的视觉动感.由相似比例度公式^[10]可知,其影响因素有元素群最小外接矩形、界面和元素的宽高比.实验的样本设计界面边框的宽高不变,界面元素为4个相同元素,各象限均为1个.元素的高度不变(10 mm),宽度分为5个等级,分别为50、40、30、20、10 mm;外接矩形宽度不变(120 mm),高度分为6个等级,分别为120、100、80、60、40、20 mm,共生成5×6=30个样本.如图6所示,样本

1~5, 外接矩形固定不变(宽为 120 mm, 高为 120 mm), 元素的宽度分为 5 个等级依次递减, 分别为 50、40、30、20、10 mm; 样本 6~10, 外接矩形不变(宽为 120 mm, 高为 100 mm), 元素的宽度同上依次递减; 以此类推.

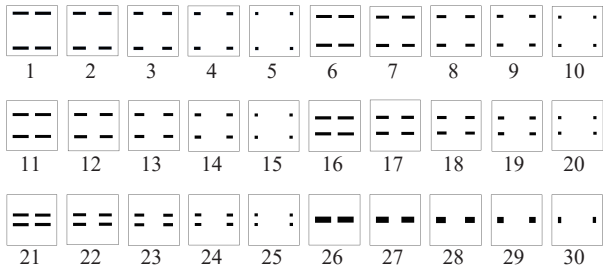


图 6 相似比例度样本

Fig.6 Samples of proportional similarity

1.2.6 次序度 次序度是衡量界面各元素位置布局是否有利于观察视线移动的程度. 正常的观察习惯是从左上开始, 来回移动, 到右下结束. 目标物体位于左上四分之一区域时最容易发现, 而右下四分之一区域是最难发现的. 由次序度公式可知^[10], 其影响因素为各元素的面积与其所在的象限, 实验的样本设计为界面元素为 4 个, 各象限均为 1 个, 4 个元素距离 x 轴 y 轴距离相同, 面积分为 5 个等级, 分别为 0、100、200、300、400 mm^2 ; 运用正交实验方法, 进行 4 因素(4 个象限)5 水平(5 个元素面积)实验, 选择 $L_{25}(5^4)$ 正交表, 生成 25 个样本, 如图 7 所示.

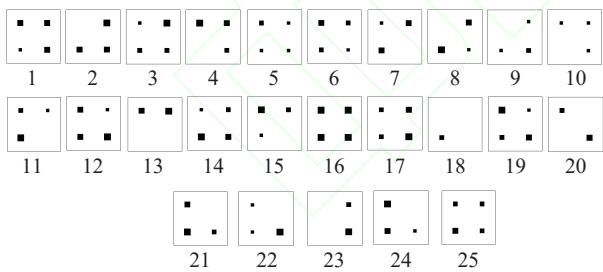


图 7 次序度样本

Fig.7 Samples of sequence

1.2.7 均匀度 均匀度是衡量界面元素的布局的均匀程度, 布局均匀的界面, 视觉协调性好、稳定性好. 反之, 视觉对比强、动态感强. 由均匀度公式^[10]可知, 其影响因素为各个象限的元素数量. 实验的样本设计为界面元素数量分别为 4、8、12、16 个; 每个象限的元素数量有 5 种情况分别为 0、1、2、3、4 个. 根据排列组合原理设计样本, 共生成 19 个样本, 如图 8 所示.

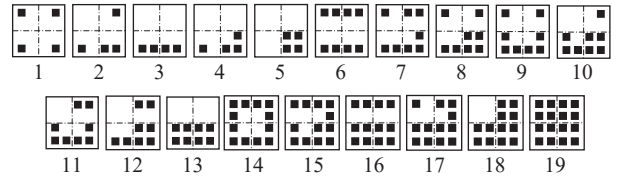


图 8 均匀度样本

Fig.8 Samples of homogeneity

1.2.8 节奏度 节奏度是衡量形态元素规律性变化的程度, 这种顺序与变化容易使人兴奋, 其通过元素的排列、尺度、数量和形式的变化来体现. 由节奏度公式^[10]可知, 其影响因素为元素中心的 x 、 y 坐标和各象限中元素的面积. 实验的样本设计为界面元素为 4 个相同元素, 各象限均为 1 个. 元素中心的 x 坐标的绝对值分别为 20、30、40、50 mm; y 坐标的绝对值分别为 20、30、40、50 mm; 元素面积分别为 100、200、300、400 mm^2 ; 三者各分为 4 个等级. 运用正交实验方法, 进行 12 因素(4 个 x 坐标、4 个 y 坐标、4 个元素面积)4 水平实验, 选择 $L_{64}(4^{12})$ 正交表, 生成 64 个样本, 如图 9 所示.

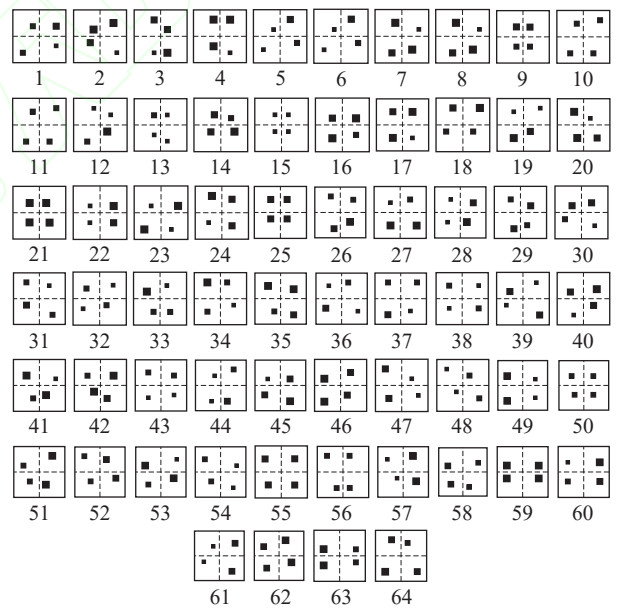


图 9 节奏度样本

Fig.9 Samples of rhythm

1.3 样本美度指标计算

根据文献 [10] 的美度指标公式, 计算 8 个实验中的各样本美度指标值, 如表 2~9 所示. 表中, B^2 为整体度, B^3 为规则度, B^4 为重复度, B^5 为相似比例度, B^6 为次序度, B^7 为均匀度, B^8 为节奏度, E 为风格美调查值.

1.4 “活泼美”评价调查实验

实验以界面的“活泼美”作为审美评价目标,

表 2 平衡度值和风格美调查值

Tab.2 Balance and stylistic beauty survey values

样本序号	B^1	E	样本序号	B^1	E
1	0.60	0.89	19	0.20	0.23
2	0.65	0.75	20	0.31	0.43
3	0.76	0.60	21	0.52	0.88
4	0.85	0.36	22	0.71	0.60
5	1.00	0.07	23	1.00	0.05
6	0.84	0.40	24	0.68	0.57
7	0.71	0.65	25	0.43	0.67
8	0.56	0.94	26	0.12	0.18
9	0.51	1.00	27	0.03	0.07
10	0.60	0.93	28	0.54	0.81
11	0.65	0.73	29	0.55	0.66
12	0.76	0.55	30	0.70	0.58
13	0.85	0.44	31	0.91	0.20
14	1.00	0.00	32	1.00	0.08
15	0.84	0.48	33	0.90	0.24
16	0.71	0.56	34	0.60	0.58
17	0.56	0.62	35	0.31	0.50
18	0.51	0.98	36	0.13	0.15

表 3 整体度值和风格美调查值

Tab.3 Unity and stylistic beauty survey values

样本序号	B^2	E
1	0.00	0.00
2	0.13	0.28
3	0.25	0.53
4	0.36	0.73
5	0.47	0.95
⋮	⋮	⋮
13	1.00	0.19

根据上述 8 个实验样本制作 7 级李克特量表进行调查实验. 活泼美感“非常强”为 7 分、“很强”为 6 分、“较强”为 5 分、“一般”为 4 分、“较弱”为 3 分、“很弱”为 2 分、“非常弱”为 1 分.

实验人数 n 根据如下公式确定:

$$n = Z^2 V^2 / D^2. \quad (4)$$

式中: Z 为可靠系数, V 为离差系数, 即样本标准差与样本的算术平均数的比, 其他数据不变的情况下离差系数越大实验人数越多; D 为期望误差.

表 4 规则度值和风格美调查值

Tab.4 Regularity and stylistic beauty survey values

样本序号	B^3	E
1	0.00	0.00
2	0.13	0.25
3	0.13	0.44
4	0.25	0.41
5	0.25	0.42
⋮	⋮	⋮
25	1.00	0.29

表 5 重复度值和风格美调查值

Tab.5 Repeatability and stylistic beauty survey values

样本序号	B^4	E
1	0.89	0.00
2	0.78	0.22
3	0.67	1.00
4	0.56	0.95
5	0.44	0.81
⋮	⋮	⋮
9	0.00	0.04

表 6 相似比例度值和风格美调查值

Tab.6 Proportional similarity and stylistic beauty survey values

样本序号	B^5	E
1	0.60	0.48
2	0.63	0.55
3	0.67	0.61
4	0.75	0.64
5	1.00	0.12
⋮	⋮	⋮
30	0.58	0.61

表 7 次序度值和风格美调查值

Tab.7 Sequence and stylistic beauty survey values

样本序号	B^6	E
1	0.75	0.68
2	0.25	0.21
3	0.63	0.63
4	0.75	0.63
5	0.75	0.58
⋮	⋮	⋮
25	0.88	0.70

表8 均匀度值和风格美调查值
Tab.8 Homogeneity and stylistic beauty survey values

样本序号	B^7	E
1	1.00	0.32
2	0.50	0.40
3	0.25	0.84
4	0.17	0.88
5	0.04	0.40
⋮	⋮	⋮
19	1.00	0.00

表9 节奏度值和风格美调查值
Tab.9 Rhythm and stylistic beauty survey values

样本序号	B^8	E
1	0.50	0.71
2	0.43	0.45
3	0.67	0.45
4	0.44	0.48
5	0.40	0.76
⋮	⋮	⋮
64	0.46	0.48

该实验设定显著性水平为 0.05, 则可靠系数为 1.96. 由于本研究为有限度的调查, 预期会有一些的误差, 因此期望误差取 20%, 即 D 为 0.2. 实验开始之前选择 15 人进行预实验, 所有指标的调查结果中, 平衡度的第 8 个样本的调查结果的离差系数最大, 为 0.65. 由此得到实验人数最少为 40.52, 最后确定被试人数为 45 人, 其中设计专业教师 5 名, 学生 17 名, 其他专业学生 23 名.

运用 SPSS 软件, 对 8 组实验的调查问卷进行 Alpha 信度系数分析^[18], 信度系数分别为 0.790, 0.807, 0.784, 0.825, 0.732, 0.789, 0.729, 0.742. 结果表明实验测量结果的信度较高, 稳定性、一致性较好.

为了尽量保证审美评价接近真实值, 运用格拉布斯准则剔除审美评价调查值的粗大误差, 得到 8 个实验各样本的风格美调查值的平均值. 为消除量纲的影响, 对于评价进行归一化处理, 结果如表 2~9 所示.

2 基于风格美的美度指标适度标准化

针对界面布局的“活泼美”, 对 8 个美度指标

分别进行适度标准化实验, 以样本的美度指标值作为 N 个离散的点的自变量 $x_i (i=1, 2, \dots, N)$ 、以“活泼美”的问卷调查值作为因变量 $y_i=f(x_i) (i=1, 2, \dots, N)$. $f(x)$ 无法由理论分析得出, 需要通过曲线拟合确定函数 $L(x)$, 用函数 $L(x)$ 来描述 y_i 与 x_i 之间的关系, 使 $L(x)$ 在 x_i 处的函数值 $L(x_i)$ 与 $f(x_i)$ 之间的偏差尽量小^[19].

曲线拟合方法有很多, 如: 多项式曲线拟合、对数曲线拟合、指数曲线拟合、幂函数曲线拟合、高斯函数曲线拟合、傅里叶函数曲线拟合等. 曲线拟合时, 一般先观察散点图的分布特征, 依据经验选择曲线的类型, 不过散点图都是相关关系的粗略表示, 有时候散点图可能与几种曲线都很接近, 这时建立相应的经验函数可能都是合理的. 由于选择不同的曲线, 得到同一个问题的多个不同经验函数, 用几种函数进行拟合时, 最常用的近似标准是最小二乘法, 具体为数据点实测值和拟合值的误差平方和最小的函数曲线作为最优经验函数 J ^[20], 公式为

$$J = \sum_{i=1}^N [f(x_i) - L(x_i)]^2. \quad (5)$$

式中: J 取极小值.

在多项式曲线拟合中, 提高阶次会改善拟合效果, 但过高阶数将导致方程病态, 因此需要根据实际情况选择合适的拟合曲线阶次.

2.1 平衡度曲线拟合

根据表 2 绘制样本的“活泼美”与平衡度的数据离散点图, 分析数据点的分布特征, 其呈倒 U 型, 依据函数曲线形态特征经验, 选择多项式、高斯函数、傅里叶函数进行曲线拟合. 运用 MATLAB 软件编写程序进行曲线拟合实验, 得到各多项式函数、高斯函数、傅里叶函数的拟合曲线, 如图 10 所示.

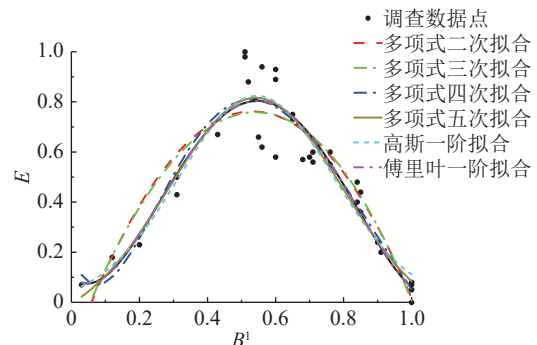


图 10 平衡度的各种拟合曲线
Fig.10 Fitting curves of equilibrium

二、三、四、五次多项式拟合函数的误差平方和分别为 0.422、0.420、0.306、0.298；一阶高斯拟合的误差平方和为 0.311，一阶傅里叶拟合的误差平方和为 0.306。多项式拟合曲线随着阶次的增加，拟合误差平方和呈下降趋势。当拟合曲线阶次大于四次时，其误差平方和变化不明显，四次多项式曲线拟合效果能够较好地反映平衡度与“活泼美”的关系。高斯、傅里叶拟合与四次多项式拟合的误差平方和差距相近，但计算公式较复杂。在保证拟合效果的情况下，避免过拟合，同时兼顾曲线拟合过程中的运算高效性，选择四次多项式进行曲线拟合。

曲线拟合优度常用相关指数 R^2 来衡量， R^2 越接近 1，则认为曲线拟合精度及可信度越好^[21]。在自然科学中，有时我们可能达到近乎完美的拟合度， R^2 接近 1，而在社会科学中，比如人的行为、情感等研究， R^2 通常远低于 1。相关指数的高低取决于系统的复杂性与不确定性。一般而言，当 R^2 大于 0.7 时，曲线拟合结果是可信的^[22-23]，本实验的 R^2 为 0.8976，表明平衡度对于“活泼美”的解释力度达到 89.76%，拟合效果较好，可解释程度较高。“活泼美”的平衡度适度标准化公式为

$$f(x) = 11.510x^4 - 25.360x^3 + 15.060x^2 - 1.251x + 0.103. \quad (6)$$

2.2 整体度曲线拟合

根据表 3，对整体度进行曲线拟合，得到二、三、四次多项式拟合的误差平方和分别为 0.082、0.035 和 0.034，一阶高斯、一阶傅里叶拟合的误差平方和为 0.077 和 0.054。选择三次多项式进行曲线拟合，如图 11 所示。拟合相关指数为 97.21%。标准化公式为

$$f(x) = -2.656x^3 + 0.822x^2 + 2.130x - 0.003. \quad (7)$$

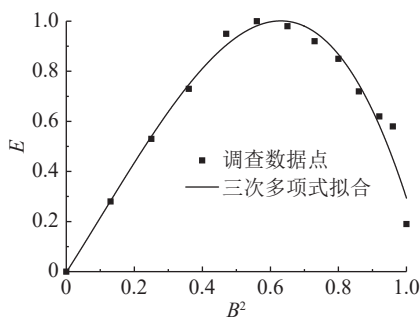


图 11 整体度的三次多项式拟合曲线

Fig.11 Cubic polynomial fitting curve of unity

2.3 规则度曲线拟合

根据表 4，对规则度进行曲线拟合，得到二、

三、四次多项式拟合的误差平方和分别为 0.339、0.315 和 0.313，一阶高斯、一阶傅里叶拟合的误差平方和为 0.315、0.314。选择三次多项式进行曲线拟合，如图 12 所示。拟合相关指数为 76.14%。标准化公式为

$$f(x) = -1.549x^3 + 0.026x^2 + 1.796x + 0.032. \quad (8)$$

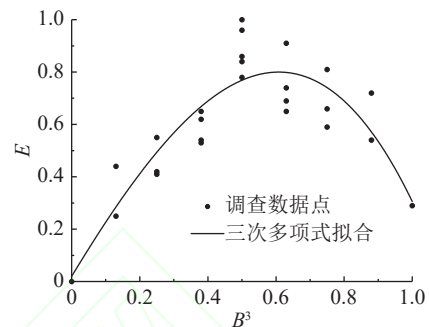


图 12 规则度的三次多项式拟合曲线

Fig.12 Cubic polynomial fitting curve of regularity

2.4 重复度曲线拟合

根据表 5，对重复度进行曲线拟合，得到二、三、四次多项式拟合的误差平方和分别为 0.308、0.136、0.125，一阶高斯、一阶傅里叶拟合的误差平方和为 0.154 和 0.157。选择三次多项式进行曲线拟合，如图 13 所示。拟合相关指数为 88.54%，标准化公式为

$$f(x) = -8.095x^3 + 6.680x^2 + 0.422x + 0.040. \quad (9)$$

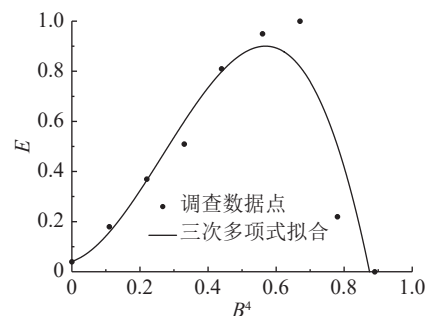


图 13 重复度的三次多项式拟合曲线

Fig.13 Cubic polynomial fitting curve of repeatability

2.5 相似比例度曲线拟合

根据表 6，对相似比例度进行曲线拟合，得到二、三、四、五次多项式拟合的误差平方和分别为 0.596、0.476、0.277 和 0.274，一、二阶高斯拟合的误差平方和为 0.620、0.367，一、二阶傅里叶拟合的误差平方和为 0.596、0.277。选择四次多项式进行曲线拟合，如图 14 所示。拟合相关指数为 78.23%，标准化公式为

$$f(x) = -35.820x^4 + 88.850x^3 - 79.860x^2 + 30.170x - 3.251. \quad (10)$$

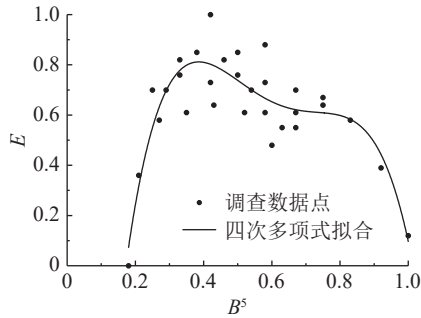


图 14 相似比例度的四次多项式拟合曲线

Fig.14 Quartic polynomial fitting curve of proportional similarity

2.6 次序度曲线拟合

根据表 7, 对次序度进行曲线拟合, 得到线性拟合的误差平方和为 0.199, 二、三、四次多项式拟合的误差平方和分别为 0.161、0.054 和 0.018, 一阶高斯、一阶傅里叶、对数、指数拟合的误差平均和分别为 0.228、0.161、0.129、0.107. 选择四次多项式进行曲线拟合, 如图 15 所示. 拟合相关指数为 98.43%, 标准化公式为

$$f(x) = 12.840x^4 - 25.030x^3 + 14.500x^2 - 1.322x - 0.023. \quad (11)$$

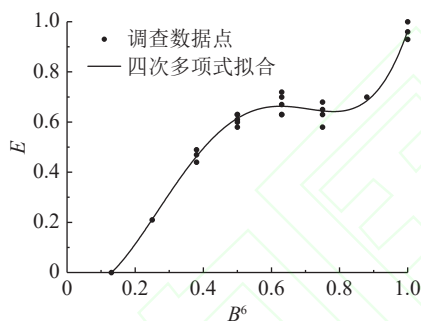


图 15 次序度的四次多项式拟合曲线

Fig.15 Quartic polynomial fitting curve of sequence

2.7 均匀度曲线拟合

根据表 8, 对均匀度进行曲线拟合, 得到四、五、六次拟合的误差平方和分别为 0.200、0.171 和 0.118, 二阶高斯、二阶傅里叶曲线拟合的误差平方和为 0.130、0.139. 选择二阶高斯进行曲线拟合, 如图 16 所示. 拟合相关指数为 91.37%, 标准化公式为

$$f(x) = 0.949 \exp \left[-\left(\frac{x+0.657}{0.505} \right)^2 \right] + 0.793 \exp \left[-\left(\frac{x-0.799}{0.619} \right)^2 \right]. \quad (12)$$

2.8 节奏度曲线拟合

根据表 9, 对节奏度进行曲线拟合, 得到线性拟合的误差平方和为 0.977, 二、三、四次多项式拟合的误差平方和分别为 0.943、0.756 和 0.637, 二阶高斯、二阶傅里叶、对数、指数函数的误差平

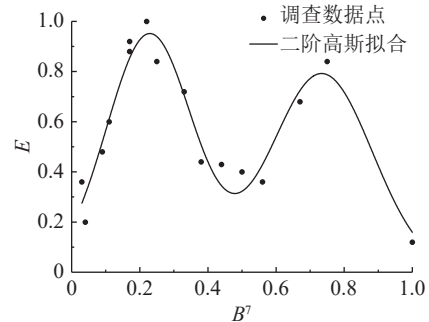


图 16 均匀度的二阶高斯拟合曲线

Fig.16 Second order Gaussian fitting curve of homogeneity

方和分别为 0.609、0.637、0.911、0.864. 选择二阶高斯进行曲线拟合, 如图 17 所示. 拟合相关指数为 71.85%. 标准化公式为

$$f(x) = 16.509 \exp \left[-\left(\frac{x+2.713}{0.550} \right)^2 \right] + 0.502 \exp \left[-\left(\frac{x-0.550}{0.332} \right)^2 \right]. \quad (13)$$

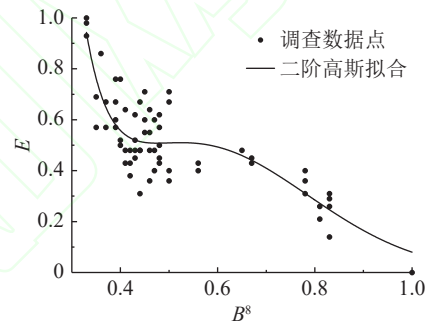


图 17 节奏度的二阶高斯拟合曲线

Fig.17 Second order Gaussian fitting curve of rhythm

由上述分析可知, “活泼美”与 8 个美度指标均成非线性关系, 且 8 组实验的拟合相关指数均大于 70%, 表明模型的拟合精度与可信度较好, 可解释程度较高可知, 之前的假设成立, 即不是所有的指标都是越大越美, 而是存在 1 个或多个适度点最美. 其中“活泼美”与 4 个美度指标的关系图成倒 U 型, 即: 平衡度、整体度、规则度和重复度. 平衡度在 0.5 附近的活泼美度较高, 在 0 和 1 附近较低; 整体度在 0.65 左右活泼美度最高; 规则度在 0.6 左右活泼美度较高; 重复度在 0.55 左右活泼美度较高. 活泼美度与相似比例度、均匀度的关系图呈双峰型, 相似比例度在 0.35 附近活泼美度较高, 在 0 和 1 附近较低; 均匀度在 0.2 和 0.75 附近活泼美度较高. 活泼美度与次序度呈正相关关系, 在 1 附近活泼美度较大, 在 0 附近较小, 在 0.55 与 0.8 之间变化较小. 活泼美度与节奏度呈负相关关系, 在 1 附近较小, 在 0.45 与 0.8 之间变化较小. 由此可以看出, 风格美是由上述多个美度指标适度化函

数构成的复合函数,其形态应该为多峰形,这与实际情况相符,即风格美有千姿百态,且各有千秋,美则更是如此。

3 界面风格美综合评价

逼近理想解排序法 (technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS) 是系统工程中常用的综合评价方法. 该方法通过定义综合评价问题的理想解和负理想解, 计算各评价对象与正理想解、负理想解的距离, 得到各方案的综合评价值, 即各评价样本与最优样本的相对接近程度, 并进行排序^[24-25]. 构建界面风格美综合评价模型的具体步骤如下.

1) 设界面样本个数为 m , 适度化后的美度指标个数为 n , 用于评价的界面样本数据矩阵: $X = (x_{ij})_{m \times n}$

2) 将矩阵与各指标的权重相乘, 得到加权矩阵: $S = (s_{ij})_{m \times n}$, 其中

$$s_{ij} = \omega_i \cdot x_{ij}. \quad (14)$$

3) 计算各样本的正、负理想解:

$$Q_j^+ = \max\{s_{ij}\}, \quad (15)$$

$$Q_j^- = \min\{s_{ij}\}. \quad (16)$$

4) 计算各样本与正、负理想解的欧式距离:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (s_{ij} - Q_j^+)^2}, \quad (17)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (s_{ij} - Q_j^-)^2}. \quad (18)$$

5) 确定接近程度, 即“活泼美”的综合评价值:

$$\xi_i = \frac{D_i^-}{D_i^- + D_i^+}. \quad (19)$$

式中: ξ_i 越大, 样本越接近理想解, 样本越优.

TOPSIS 模型构建中, 采用相关性定权法 (criteria importance through intercriteria correlation, CRITIC) 确定权重. 该方法是以指标的变异大小和指标间的冲突性来综合衡量各指标的客观权重, 不受人的主观因素影响^[26]. 变异大小表示指标在不同样本间的取值差距, 以标准差的形式来表现, 标准差越大, 数据样本反映的信息量越大, 权重越大. 指标间的冲突性以指标间的相关性来衡

量, 当标准差一定时, 相关系数越大, 说明两者的冲突性较低, 信息量有相似性, 所以权重越小^[27]. 第 j 个指标与其他指标之间的冲突性为

$$r_j = \sum_{k=1}^n (1 - r_{kj}). \quad (20)$$

式中: r_{kj} 为第 k 个指标和第 j 个指标之间的相关系数. 第 j 个指标所包含的信息量为

$$C_j = \sigma_j \sum_{k=1}^n (1 - r_{kj}). \quad (21)$$

式中: σ_j 为第 j 个指标样本间的标准差. 利用 CRITIC 法得到的第 j 个指标的归一化权重为

$$W_j = C_j / \sum_{k=1}^n C_k. \quad (22)$$

4 实例验证

以复印打印一体机操作界面布局的“活泼美”评价为例, 验证该模型的有效性.

4.1 界面美度指标适度标准化计算

从市场上收集不同的复印打印一体机界面样本 65 个, 运用亲和图法 (jiro kawakita, KJ) 筛选 10 个代表性样本. 由于样本大小变化不会影响审美评价的结果, 为了方便计算, 样本宽度取统一值, 并将功能分区抽象为能够包含其内部元素的最小矩形, 得到各样本的布局图, 如图 18 所示.

根据文献 [10] 的公式计算 10 个样本的 8 个指标值, 根据式 (6)~(13) 对其进行适度化处理. 根据文献 [16]、[17] 中的方法对密集度和比例度进

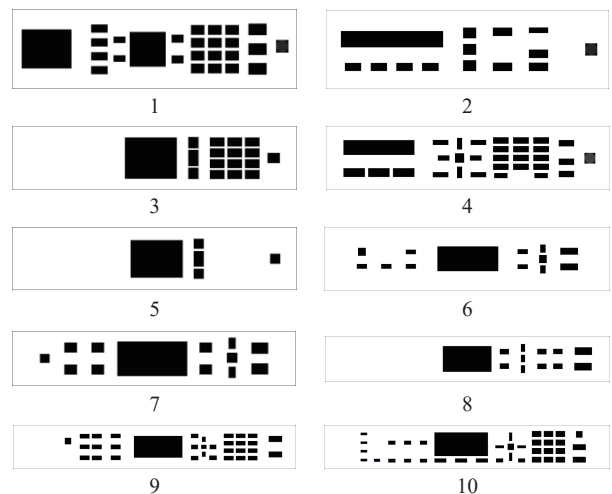


图 18 10 个样本界面元素布局图

Fig.18 10 Samples Interface Element Layout

行适度化处理, 得到 10 个样本的 10 个美度指标的适度标准化值 S_M , 如表 10 所示.

4.2 综合评价计算

根据表 10 的数据和式(20)~(22), 求解各个指标的标准差 σ_j , 计算信息量 C_j 以及权重 W_j , 如表 11 所示. 由式(14)~(19)计算各样本的正理想解 D_i^+ 、负理想解 D_i^- 、综合美度 ξ_i 及其排名, 如表 12 所示.

4.3 验证与讨论

运用心理物理学中的两极递进式排序法对 10 个界面样本的“活泼美”进行调查评分, 试验人数为 45 人, 其中设计专业学生 20 名, 其他专业学生 25 名. 让被试者在所有样本中选出“活泼美”最好的样本, 计 1 分, 选出最差的样本, 计 0.1 分; 去除此 2 个样本, 在剩下的样本中选出最好的样本, 计 0.9 分, 选出最差的样本, 计 0.2 分; 依次进行, 直至 10 个样本均被评分. 对 45 名被试者的评分求平均值, 得到 10 个界面样本的“活泼美”的评分

与排序, 如表 12 所示.

从表 12 可以看出, 样本 3 和样本 9 的调查排名与综合评价排名之差均为 3 个名次, 误差略大. 样本 2 误差为 2 个名次, 样本 1 和样本 6 误差为 1 个名次, 此三者属于可以接受的误差范围, 其他样本两种评价方式的排名结果一致. 产生误差的原因如下: 1) 由于样本调查数量的限制, 45 个被试的评价结果未必能完全反应总体的水平. 2) 审美评价除了受审美对象的客观因素影响, 还会受到审美主体的审美思维结构、个人偏好、审美经验、个人经历等内部因素及社会文化、时尚潮流、风俗习惯等外部环境因素的影响, 这是后续研究工作中需要继续探讨的问题. 实验结果表明, 以某种风格美为评价目标, 将美度指标适度标准化, 以此构建的界面综合评价模型与实际情况接近, 有效地模拟人们的审美认知方式, 对界面风格美设计具有切实的指导作用.

表 10 10 个样本界面各美度指标适度标准化值

Tab.10 Moderately standardized values of the aesthetic measure indexes of 10 samples interfaces

样本序号	S_M									
	平衡度	整体度	规则度	重复度	相似比例度	次序度	均匀度	节奏度	密集度	比例度
1	0.35	0.96	0.49	0.76	0.68	0.97	0.67	0.98	0.58	0.64
2	0.80	0.99	0.34	0.95	0.66	0.97	0.25	0.51	0.34	0.65
3	0.79	0.83	0.44	0.82	0.63	0.62	0.30	0.98	0.44	0.65
4	0.74	0.99	0.45	0.72	0.64	0.97	0.55	0.52	0.44	0.58
5	0.78	0.91	0.38	0.33	0.66	0.65	0.74	0.98	0.27	0.76
6	0.49	0.94	0.43	0.94	0.71	0.65	0.61	0.53	0.30	0.57
7	0.06	0.99	0.49	0.94	0.66	0.97	0.69	0.98	0.49	0.67
8	0.80	0.91	0.52	0.89	0.69	0.62	0.35	0.98	0.32	0.90
9	0.66	1.00	0.49	0.42	0.70	0.65	0.30	0.53	0.43	0.61
10	0.12	0.98	0.45	0.58	0.63	0.65	0.88	0.52	0.45	0.62

基于“活泼美”的美度指标适度标准化过程, 有效证明了不同风格的审美标准与传统笼统评价的审美标准不同, 传统的评价方法对于风格美评价并不适用. 例如: 样本 7 原平衡度最高, 适度化后最低, 对于综合评价的贡献较小. 10 个样本原整体度有一定的差距, 适度化后差距减小, 表明整体度对于“活泼美”综合评价的贡献差距不大.

以指标间的变异大小和冲突性来综合衡量美度指标的客观权重, 表示各个指标对于综合评价的贡献值. 在本实验中权重较高的指标有比例度、平衡度、均匀度; 较低的指标有相似度、规则度、整体度, 如表 11 所示. 权重较高的指标, 布局

设计时应该着重考虑, 权重较低的指标审美特征不明显, 根据实际需要可以在较大范围内进行调整和修正.

结合图片与美度指标数据可以看出: 样本 8 的综合评价排名和调查排名均为第一, 原平衡度、规则度、均匀度、节奏度较低, 适度化之后指标数值均增加; 原整体度较高, 适度化后整体度也较高; 比例度适度化后的数值较高, 因此样本 8 的最终排名最高. 从图形视觉认知的角度来看, 样本 8 中元素分布在界面右侧, 具有动态感, 采用较多相同的元素, 重复性较好, 大部分元素的比例接近黄金比, 排列与对齐也较好且富于变化,

表 11 各美度指标的标准差、信息量和权重

Tab.11 Standard deviation, information quantity and weight of each aesthetic measure index

美度指标	σ_j	C_j	W_j
平衡度	0.289	3.167	0.195
整体度	0.053	0.483	0.030
规则度	0.054	0.430	0.026
重复度	0.225	1.973	0.121
相似比例度	0.027	0.237	0.015
次序度	0.171	1.418	0.087
均匀度	0.220	2.156	0.132
节奏度	0.242	2.043	0.126
密集度	0.097	0.826	0.051
比例度	0.100	3.551	0.218

表 12 10 个样本的综合评价与调查值

Tab.12 Synthetic evaluation and survey values of 10 sample interface

样本序号	综合评价值	综合评价排名	调查值	调查排名
1	0.549	7	0.320	8
2	0.615	5	0.810	3
3	0.659	3	0.505	6
4	0.649	4	0.740	4
5	0.661	2	0.855	2
6	0.557	6	0.420	7
7	0.442	9	0.230	9
8	0.688	1	0.870	1
9	0.487	8	0.625	5
10	0.367	10	0.200	10

错落有致,形态的大小与距离有变化与对比,但不是很强烈,整体比较和谐,视觉线路清晰,视觉组织有序,故“活泼美”评价最好.另外样本 10 原平衡度、重复度较高,适度化之后这些指标较低;节奏度适度化之后的数值较低,最后的实验排名最低.样本 10 中元素形态种类较多,变化较大,对比强烈,元素缺乏良好地组织,整体比较复杂、零散,视觉线路混乱不清,故“活泼美”评价较低.

5 结 论

(1)提出基于某种具体风格的界面布局审美评价方法.该方法较传统笼统的评价方式更加符合人们的审美认知方式,更加切合设计实践中目

标风格定位的需求.

(2)针对具体的设计风格,设计美度指标适度化实验,运用计算美学方法与曲线拟合技术对美度指标适度标准化,得到风格美与美度指标适度化的定量关系表达式,实现隐性美的外显化,为客观审美评价奠定了基础.此外,风格美是由多个美度指标适度化函数耦合形成的多峰函数,验证了美有千姿百态,且各有千秋的美学现象.

(3)基于 TOPSIS 法与 CRITIC 法构建客观的风格美综合评价模型.指标权重不受人的主观因素的影响,能够有效指导界面布局的风格设计.该模型可以作为界面进化设计系统的适应度评价函数,为发展界面智能设计提供可靠的技术支撑.

(4)所提方法是对传统审美评价方法的改进和创新,其应用效果还有待进一步验证:本研究只针对活泼美进行研究,其他类型风格美的美度指标适度标准化还需进一步研究;可以考虑采用其他方法对指标适度标准化进行对比研究;可以考虑采用其他方法对审美综合评价进行对比研究.

参考文献 (References):

- [1] MENDEL J. Understanding the relative attentional demands of the dimensions of interface consistency [J]. *International Journal of Cardiology*, 2012, 53(2): 189–192.
- [2] PETERSEN M G, HALLNAES L, JACOB R J K. Introduction to the special issue on the aesthetics of interaction [J]. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 2008, 15(3): 1–5.
- [3] BALINSKY H. Evaluating interface aesthetics: measure of symmetry [J]. *Proceedings of SPIE: The International Society for Optical Engineering*, 2006, 6076: 52–63.
- [4] ZHOU L, XUE C Q, TOMIMATSU K. Research of interface composition design optimization based on visual balance [J]. *Practical Applications of Intelligent Systems*, 2014, 279(1): 483–493.
- [5] LAI C Y, CHEN P H, SHIH S W, et al. Computational models and experimental investigations of effects of balance and symmetry on the aesthetics of text-overlaid images [J]. *International Journal of Human-Computer Studies*, 2010, 68(1/2): 41–56.
- [6] BAUERLY M, LIU Y. Effects of symmetry and number of compositional elements on interface and design aesthetics [J]. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 2008, 24(3): 275–287.
- [7] VALENCIA R A, LUGO J E. Part-worth utilities of gestalt principles for product aesthetics: a case study of a bottle silhouette [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2016, 138(8):

- 801102.
- [8] MAITY R, MADROSIYA A, BHATTACHARYA S. A computational model to predict aesthetic quality of text elements of GUI [J]. **Procedia Computer Science**, 2016, 84: 152-159.
- [9] HSIAO S W, CHOU J R. A Gestalt-like perceptual measure for home page design using a fuzzy entropy approach [J]. **International Journal of Human-Computer Studies**, 2006, 64(2): 137-156.
- [10] NGO D C L, TEO L S, BYRNE J G. Modelling interface aesthetics [J]. **Information Sciences**, 2003, 152(8): 25-46.
- [11] 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 Deng-qi, TANG Wen-cheng, et al. Aesthetic evaluation method of interface elements layout design [J]. **Journal of Computer Aided Design and Graphics**, 2013, 25(5): 758-766.
- [12] 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 product form aesthetic evaluation system [J]. **Journal of Mechanical Engineering**, 2018, 54(15): 150-159.
- [13] 罗仕鉴,翁建广,陈实,等.基于情境的产品族设计风格DNA[J].浙江大学学报:工学版,2009,43(6):1112-1117.
LUO Shi-jian, WENG Jian-guang, CHEN Shi, et al. Scenario-based product family design styling DNA [J]. **Journal of Zhejiang University: Engineering Science**, 2009, 43(6): 1112-1117.
- [14] 徐江,王海贤,孙守迁.基于风格进化模型的产品生成设计方法[J].东南大学学报:自然科学版,2012,42(4):654-658.
XU Jiang, WANG Hai-xian, SUN Shou-qian. Method of product generative design based on style evolution model [J]. **Journal of Southeast University: Natural Science Edition**, 2012, 42(4): 654-658.
- [15] XIONG B, DU Z, LI J. Modulation index optimization for optical fringe suppression in wavelength modulation spectroscopy [J]. **Review of Scientific Instruments**, 2015, 86(11): 113104.
- [16] TULLIS T S. Predicting the usability of alphanumeric displays [J]. **Dissertation Abstracts International**, 1984, 45(4): 1310.
- [17] MARCUS A. **Graphic design for electronic documents and user interfaces** [M]. New York: ACM, 1991: 218-221.
- [18] 张芳,程文红,肖泽萍,等.渥太华自我伤害调查表中文版信效度研究[J].上海交通大学学报:医学版,2015,35(3):460-464.
ZHANG F, CHENG W H, XIAO Z P, et al. Study on reliability and validity of Chinese version of Ottawa self-injury inventory [J]. **Journal of Shanghai Jiaotong University: Medical Science**, 2015, 35(3): 460-464.
- [19] KIM C J, PARK S H, SUNG S K, et al. Dynamic modeling and analysis of vortex filament motion using a novel curve-fitting method [J]. **Chinese Journal of Aeronautics**, 2016, 29(1): 53-65.
- [20] ASHOK S D. Least square curve fitting technique for processing time sampled high speed spindle data [J]. **International Journal of Manufacturing Research**, 2011, 6(3): 256-276.
- [21] 陈志林,邢世雄.HPGe探测器在121 keV~1408 keV之间的效率拟合函数比较[C]//第二届全国核技术及应用研究学术研讨会大会论文摘要集.绵阳:中国核物理学会、国家核技术工业应用工程技术研究中心,2009.
CHEN Zhi-lin, XING Shi-xiong. Comparison of efficiency functions for HPGe gamma-ray detectors in the 121~1408 keV energy range [C]// **Paper Abstract of the 2nd National Conference on Nuclear Technology and Application Research Conference**. Mianyang: Chinese Society of Nuclear Physics, National Engineering Research Center of Nuclear Technology Application in Industry, 2009.
- [22] 艾俊强,周莉,杨青真.S弯隐身喷管[M].北京:国防工业出版社,2017:250-255.
- [23] 李威,蒋平,赵卫权,等.TRMM卫星降水数据在喀斯特山区的适用性分析——以贵州省为例[J].水土保持研究,2016,23(1):97-102.
LI Wei, JIANG Ping, ZHAO Wei-quan, et al. Analysis on applicability of TRMM precipitation data in karst areas: a case study in Guizhou Province [J]. **Research of Soil and Water Conservation**, 2016, 23(1): 97-102.
- [24] SEVASTJANOV P, TIKHONENKO A. Direct interval extension of TOPSIS method [J]. **Expert Systems with Applications**, 2013, 40(12): 4841-4847.
- [25] ZHANG X, XU Z. Extension of TOPSIS to multiple criteria decision making with pythagorean fuzzy sets [J]. **International Journal of Intelligent Systems**, 2014, 29(12): 1061-1078.
- [26] BHASIN S, KAMALAPURKAR R, JOHNSON M, et al. A novel actor-critic-identifier architecture for approximate optimal control of uncertain nonlinear systems [J]. **Automatica**, 2013, 49(1): 82-92.
- [27] WANG J, DING X, LAHIJANIAN M, et al. Temporal logic motion control using actor-critic methods [J]. **International Journal of Robotics Research**, 2012, 34(10): 1329-1344.