

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412646

显微仪器产品美度指标构建及评价方法研究

王勇^{1,2}, 谭久彬²

(1. 哈尔滨工业大学建筑与设计学院 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工业大学仪器科学与工程学院 哈尔滨 150001)

摘要: 显微仪器外观美感能体现其产品的高端品质,同时提升操作者使用体验的愉悦性。建立显微仪器产品美度指标及评价方法能够量化显微仪器的外观美感,便于客观的形式美与人主观的感受美达成一致,从而有效指导显微仪器产品的美学设计。首先针对显微仪器产品的特点,基于形式美法则,依据 Ngo 和 Birkhoff 美度计算模型构建了显微仪器产品美度评价的7个量化指标,即平衡度、对称度、比例度、节奏度、整体度、秩序度、色彩美度;然后分析了7个美度指标间的相关性,建立了计算产品美度模糊评价矩阵 R ;最后以四款激光扫描共聚焦生物显微镜为样本,采用美度评价指标与模糊综合评价方法对其外观美感进行了主客观综合评价,结果显示哈工大设计的样本4的模糊综合评价向量 $B_4 = [0, 0.3534, 1.0425, 0.8883, 1.2562]$,表明其美度等级较高,具有更好的整体感与秩序性。

关键词: 显微仪器;美度指标;评价方法;模糊综合评价

中图分类号: TH742 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Beauty indexes and evaluation method of microscopic instruments

Wang Yong^{1,2}, Tan Jiubin²

(1. School of Architecture and Design, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. School of Instrumentation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The aesthetic appearance of the microscopic instruments can reflect the advanced qualities, while improving the pleasure of the operation experience. The establishment of aesthetics indexes and evaluation method of microscopic instruments can quantify the beauty degree of instruments' appearance, and make the objective formal beauty correspond with the subjective feeling beauty, so as to effectively guide the aesthetic design of microscopic instruments. First, based on the features of microscopic instruments, the rules of beautiful form, and the beauty calculation model of Ngo and Birkhoff, seven quantitative indicators for the beauty evaluation of microscopic instruments were constructed such as Balance, Symmetry, Proportion, Rhythm, Unity, Order and Color. Then, the correlation among 7 beauty indexes was analyzed, and the fuzzy evaluation matrix R for calculating products' beauty was established. Finally, taking four types of laser scanning confocal biological microscopes as samples, the subjective and objective comprehensive evaluation was made by applying aesthetics indexes and the fuzzy comprehensive evaluation method. The results show that the fuzzy comprehensive evaluation vector of the sample 4 designed by Harbin Institute of Technology is $B_4 = [0, 0.3534, 1.0425, 0.8883, 1.2562]$, which indicates that its beauty grade is higher than others, and it has a better performance of unity and order.

Keywords: microscopic instruments; beauty indexes; evaluation method; fuzzy comprehensive evaluation

0 引言

显微仪器外观美感是其产品宜人性、高品质的体现。就人因学而言,人的作业心理与作业功效紧密关联,良好的作业动机会产生良好的作业效果。由于生物显微镜常

用于观测生物切片、生物细胞、细菌以及活体组织培养等作业,具有无法自动识别、主要依赖人的主观探知来完成工作的特性,需要操作者长时间使用仪器进行专注观察、精细调节,因此特别容易使操作者产生作业疲劳和情绪烦躁。这就要求显微仪器设计者不能只关注产品的功能,要从人因学的角度综合考虑人的使用感受、情感需

求,而其产品呈现的外部形式美感会给使用者带来愉悦的使用体验与良好的视觉感受,可以从生理、心理两方面缓解作业疲劳,从而在一定程度上提高作业效率。建立显微仪器产品美度评价体系能够量化显微仪器的外观美感,便于客观的形式美与人的主观感受美达成一致,从而有效指导显微仪器产品的美学设计。

产品美度评价作为推动产品美学设计发展的重要因素,已逐渐成为设计研究的热点之一。20世纪30年代,著名数学家 Birkhoff^[1]提出美学度量公式,将美度表示为“秩序”除以“复杂度”的商,奠定了计算美学的理论基础。国内外学者在平面设计中进行了美度量化研究。如 Ngo 等^[2]建立了界面设计的美度计算公式,量化了界面布局特征,实现了界面设计的美度分析。Hsiao 等^[3]基于完形心理学原则,运用模糊信息熵方法构建了网页设计的审美认知模型。Zhenyu 等^[4]通过将神经网络的学习机制整合到交互进化系统中来实现用户在交互进化过程中的审美评价,减少了用户评估和选择设计的繁琐工作。李永锋等^[5]提出基于模糊层次分析法的产品可用性评价方法。周蕾等^[6]运用灰色关联分析研究设计方案的美度优势次序,开发了交互界面美度计算原型系统。吕健等^[7]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。李晓英等^[8]提出了运用感性工学、因子分析、平面坐标定位,美度公式等分析与计量手段来建构一种基于计算美学的实体界面美度评估方法。曾利等^[9]建立了家具美度评价指标体系以及家具美度模糊综合评价模型,该评价模型能较准确地反映家具的美度值。针对产品形态美度评价,苏建宁等^[10]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;周爱民等^[11]依据形式美学与完形心理学原理,构建了产品形态美度指标组成的评价体系,基于最大流原理建立了产品形态审美综合评价的非线性信息动力学模型;张书涛等^[12]结合熵理论提出一种产品美度综合评价方法,提高了评价结果的客观性和准确性。Liu 等^[13]提出了一种基于眼动追踪和美感测量的产品外观设计评价方法。利用眼动追踪技术对各备选方案的美感进行评价,探索了一种简单、实用、低成本的产品外观设计评价方法。

产品的色彩设计与美度评价主要运用色彩理论以及建立色彩体系的数字化与工具的色彩模型。Shih 等^[14]提出了一种用配色来评价产品形象美度的方法。在色彩意象方面的研究侧重于捕捉产品色彩所对应的用户心理信息^[15],一般采用感性工学的量化方法配合灰色理论、遗传算法等智能理论进行意象评估和色彩组合优化^[16],以及基于孟斯宾瑟的色彩调和理论建立的色彩动态调和模型与评价方法^[17]。

综上所述,目前产品美度评价研究主要集中于机床、汽车、家具、文创产品、界面设计等领域,而显微仪器产品尚未涉及,没有针对显微仪器产品的美度指标与评价方法。由于显微仪器在操作时与人体手眼等部位紧密关联,其产品美学设计直接关乎使用者的视觉感官与操作体验,因此,要建立显微仪器产品美度评价体系,以确保有效指导其产品美学设计,便于建立健全显微仪器产品评价体系。

基于上述问题,本文针对显微仪器产品美度指标建立及其评价方法展开研究。具体思路如下:首先依据形式美法则,在 Ngo 美度计算模型基础上,针对显微仪器产品的特点构建其美度评价指标;然后建立模糊综合评价模型;最后以4款激光扫描共聚焦生物显微镜为例,验证显微仪器产品美度评价指标与评价方法的可行性。

1 显微仪器产品美度评价指标的建立

显微仪器作为一种较为特殊的产品,其美学设计要在遵循审美认知规律、形式美法则的基础上,结合产品自身的功能结构、使用方式等特点进行创造。因此,显微仪器产品美度评价指标同样要围绕形式美中比例与尺度、对称与平衡、节奏与韵律、变化与统一等法则进行构建。

依据形式美法则,在 Ngo 美度计算模型基础上,构建显微仪器产品造型的美度评价指标。以一款激光共聚焦显微镜为例,将显微镜分为6个部分,即主体(包含光源模块)、目镜模块、集光器模块、载物台模块(包括物镜)、共焦显微模块、显示器模块。以目标产品底部重心为坐标系原点创建笛卡尔坐标系,以形体某部分的中心点/重心点坐标系数值定量表达产品形态。

1.1 平衡度

形式美是对美的形式的直觉抽象和概括。其中的平衡是指两个以上要素之间构成的均势状态,强化了事物的统一性和稳定感。格式塔心理学运用物理“场”的原理构建一种视觉作用的“力与场”的平衡关系。平衡往往集中于那些具有重力优势的一个或多个集节点上(或焦点上)。显微仪器产品一般由显微镜主体及其配件组成。当主体部分与各配件部分所处的空间位置均衡,显微仪器产品能够体现出平衡美感。在显微仪器产品使用过程中,使用者主要以俯视的姿态观察目镜,同时也会查看显微仪器配件的电子显示屏幕上的信息。显微仪器产品的正面形态、侧面形态、顶面形态都会被使用者观察到。因此,需要考察显微仪器产品在“上下”、“左右”、“前后”3个方向的平衡性。基于重力场概念,显微仪器产品平衡度(balance, BA)可通过计算产品上半部分重

心与下半部分重心之间的差异、左半部分重心与右半部分重心之间的差异和前半部分重心与后半部分重心之间的差异而得到：

$$BA_p = 1 - \frac{\frac{|G_L - G_R|}{\max(G_L, G_R)} + \frac{|G_T - G_D|}{\max(G_T, G_D)} + \frac{|G_F - G_B|}{\max(G_F, G_B)}}{3} \quad (1)$$

其中，

$$G_j = \sqrt{(x_j - x_c)^2 + (y_j - y_c)^2 + (z_j - z_c)^2} \quad (2)$$

j 分别为显微镜的左右上下前后 (L、R、T、D、F、B) 六个部分。如图 1 所示, (x_c, y_c, z_c) 代表显微镜重心坐标, (x_j, y_j, z_j) 代表 j 部分的重心坐标。 G_j 代表显微镜产品整体的重心点与产品 j 部分重心点之间的距离。

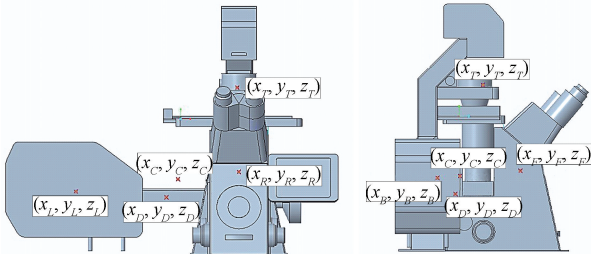


图 1 显微镜重心坐标

Fig. 1 Barycentric coordinates of microscope

1.2 对称度

对称是指图形或实体相同部分有规律的重复。具有对称特征的产品常常带给人以稳定、庄重、条理化的感觉。对称度 (symmetry, SYM) 就是显微仪器产品在不同平面划分下对称的程度, 与平衡度不同的是, 对称度进一步衡量了显微仪器产品各个组成部分占据空间大小是否一致。同样需要考察显微仪器产品在“上下”, “左右”, “前后” 3 个方向的对称性。通过计算沿 x 轴方向、 y 轴方向、 z 轴方向、 $x-y$ 平面对角线方向、 $x-z$ 平面对角线方向、 $y-z$ 平面对角线方向的产品元素间对称程度得到。

通过显微镜中心点 (x_c, y_c, z_c) 做 3 个平面 ($X-Y$ 平面, $X-Z$ 平面, $Y-Z$ 平面), 将显微镜分为 8 个部分, 分别是: ULF (左上前), ULB (左上后), LLF (左下前), LLB (左下后), URF (右上前), URB (右上后), LRF (右下前), LRB (右下后), 如图 2 所示。

在式 (5) 中, (x_c, y_c, z_c) 代表显微镜中心坐标, (x_j, y_j, z_j) 代表 j 部分的中心坐标。 x_j, y_j, z_j 分别由 j 部分中心点与显微镜中心点之间的坐标差值的绝对值表示。 R_j 代表 j 部分中心点与显微镜中心点之间的距离, θ_j 代表 j 部分中心点与显微镜中心点连线与 Z 轴之间的夹角。

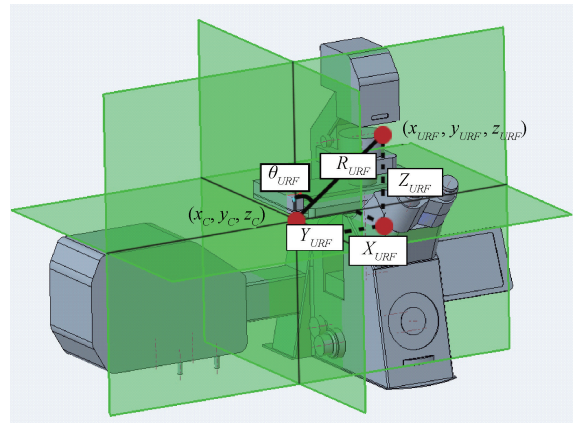


图 2 显微镜对称度参数

Fig. 2 Symmetry parameters of microscope

$$SYM_p = 1 - \frac{SYM_x + SYM_y + SYM_z + SYM_{xy} + SYM_{xz} + SYM_{yz}}{6} \quad (3)$$

其中,

$$\begin{aligned} & |X'_{ULF} - X'_{URF}| + |X'_{LLF} - X'_{LRF}| + |X'_{ULB} - X'_{URB}| \\ & + |X'_{LLB} - X'_{LRB}| + |Y'_{ULF} - Y'_{URF}| + |Y'_{LLF} - Y'_{LRF}| \\ & + |Y'_{ULB} - Y'_{URB}| + |Y'_{LLB} - Y'_{LRB}| + |Z'_{ULF} - Z'_{URF}| \\ & + |Z'_{LLF} - Z'_{LRF}| + |Z'_{ULB} - Z'_{URB}| + |Z'_{LLB} - Z'_{LRB}| \\ & + |R'_{ULF} - R'_{URF}| + |R'_{LLF} - R'_{LRF}| + |R'_{ULB} - R'_{URB}| \\ & + |R'_{LLB} - R'_{LRB}| + |\theta'_{ULF} - \theta'_{URF}| + |\theta'_{LLF} - \theta'_{LRF}| \\ & + |\theta'_{ULB} - \theta'_{URB}| + |\theta'_{LLB} - \theta'_{LRB}| \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{cases} X_j = |x_j - x_c| \\ Y_j = |y_j - y_c| \\ Z_j = |z_j - z_c| \\ R_j = \sqrt{X_j^2 + Y_j^2 + Z_j^2} \\ \theta_j = \arctan \frac{\sqrt{X_j^2 + Y_j^2}}{Z_j} \end{cases} \quad (5)$$

1.3 比例度

比例在美学定义中通常是指形体之间的大小、宽窄、高低的匀称关系。人们把 1/1.618、1/1、1/1.414、1/1.732 和 1/2 等常用美学比例, 运用于产品形态设计之中。对于显微仪器产品, 比例是否协调也是最为重要的美学评价指标之一。显微仪器产品形态的比例度 (proportion, PR) 可利用常用的美学比例来计算。通过计算显微镜正视图长宽比例值与常用美学比例的相差程度得到比例度。

$$PR_p = 1 - D_{object} \quad (6)$$

其中,

$$\begin{cases} D_{object} = \min(|s - t|), \\ s = 1/1, 1/1.414, 1/1.618, 1/1.732, 1/2 \\ t = \frac{H}{B}, \quad \frac{H}{B} \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

其中, s 代表产品设计中常用的美学比例。如图3所示, H 与 B 分别代表显微镜的高和宽。

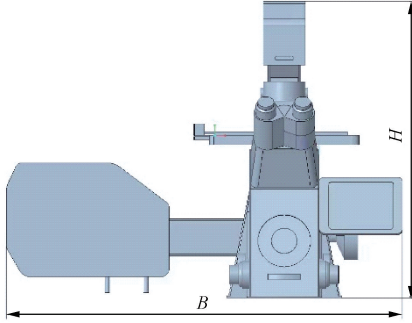


图3 显微镜的高度和宽度

Fig. 3 Height and width of microscope

1.4 节奏度

节奏在产品造型中表现为设计要素的一种有规则的重复,能够产生秩序感。可利用产品设计元素间变化的规则计算产品形态的节奏度。显微仪器产品功能部件

$$O_{vm} = \left[\frac{\min(v'_1, v'_2)}{\max(v'_1, v'_2)} + \frac{\min(v'_2, v'_3)}{\max(v'_2, v'_3)} + \dots + \frac{\min(v'_{n-1}, v'_n)}{\max(v'_{n-1}, v'_n)} \right] \frac{n!}{2(n-2)} \quad (10)$$

$$\begin{cases} X_j = \sum_i^{n_j} |x_{ij} - x_c| \\ Y_j = \sum_i^{n_j} |y_{ij} - y_c| \\ Z_j = \sum_i^{n_j} |z_{ij} - z_c| \end{cases} \quad (11)$$

如图4所示,与对称度的计算类似,将产品分为ULF(左上前)、ULB(左上后)、LLF(左下前)、LLB(左下后)、URF(右上前)、URB(右上后)、LRF(右下前)、LRB(右下后)8个部分,如图4所示,求解产品元素中心坐标(x_{ji} , y_{ji} , z_{ji})与产品中心坐标(x_c , y_c , z_c)差值。通过计算得出 R_x 、 R_y 和 R_z 。公式中 X'_j 、 Y'_j 和 Z'_j 分别为 X 、 Y_j 和 Z_j 规范化处理后的无量纲值, V_n 是产品元素的体积。

1.5 整体度

整体是指在视觉上被感知为一个有机整体。整体性高的产品造型各组成部分通过一定的内在关系有序组织在一起,其完整之美更容易被人感知到。显微仪器产品结构复杂,产品的功能形态存在较大差异,如果按各部件原本形态堆叠在一起极易造成零乱的产品外观效果,不仅视觉感受混乱,而且会使用户不易快速识

多,设计元素的空间排布难度大,利用有规则的重复设计元素简化产品形态,使其产生秩序感。因此对于显微仪器产品的美度评价,节奏度是非常重要的评价指标。显微仪器产品的节奏度(rhythm, RHM)可通过计算显微仪器产品元素的体积差异以及产品元素中心坐标与产品整体的中心坐标之间的差异性得到。

$$RHM_p = 1 - \frac{RHM_x + RHM_y + RHM_z + O_{vm}}{4} \quad (8)$$

其中,

$$\begin{aligned} & |X'_{ULF} - X'_{URF}| + |X'_{LLF} - X'_{LRF}| + |X'_{ULB} - X'_{URB}| \\ & + |X'_{LLB} - X'_{LRB}| + |X'_{ULF} - X'_{LLF}| + |X'_{ULB} - X'_{LLB}| \\ & + |X'_{URF} - X'_{LRF}| + |X'_{URB} - X'_{LRB}| + |X'_{ULF} - X'_{ULB}| \\ & + |X'_{LLF} - X'_{LLB}| + |X'_{URF} - X'_{URB}| + |X'_{LRF} - X'_{LRB}| \\ & + |X'_{ULF} - X'_{LLB}| + |X'_{URF} - X'_{LRB}| + |X'_{ULB} - X'_{LLF}| \\ & + |X'_{URB} - X'_{LRF}| + |X'_{ULF} - X'_{LRF}| + |X'_{URF} - X'_{LLF}| \\ & + |X'_{ULB} - X'_{LRB}| + |X'_{URB} - X'_{LLB}| + |X'_{ULF} - X'_{URB}| \\ & + |X'_{ULB} - X'_{URF}| + |X'_{LRB} - X'_{LLF}| + |X'_{LLB} - X'_{LRF}| \\ & + |X'_{ULF} - X'_{LRB}| + |X'_{LLF} - X'_{URB}| + |X'_{ULB} - X'_{LLF}| \\ & + |X'_{LLB} - X'_{URF}| \end{aligned}$$

$$RHM_x = \frac{\quad}{28} \quad (9)$$

别显微仪器的各个功能,从而降低产品使用的愉悦体验。因此显微仪器产品造型的整体度(unity, U)是一个非常有必要衡量的指标。针对显微仪器产品,可根据产品几个主要部分之间的体积关系来表达整体度量。

$$U_p = (|U_{volume}| + |U_{part}|) / 2 \quad (12)$$

其中,

$$\begin{cases} U_{volume} = \frac{\max(u_i) - \min(u_i)}{U_{product}} \\ U_{part} = 1 - \frac{n-2}{n} \end{cases} \quad (13)$$

式中: n 是产品部件数; u_i 是产品部件的体积; $U_{product}$ 是产品的总体积。

1.6 秩序度

秩序是指按照一定规则和原理组织形体各个部分,使之体现出规整的视觉状态。造型设计追求体现秩序形式,秩序可使复杂事物单纯化、系统化,更容易获得认知。显微仪器产品结构复杂,可运用秩序知觉的特性计算显微仪器产品形体的秩序度(order, OR)。显微仪器产品设计中的秩序度是通过在不同设计元素中使用相似的设计尺寸或间隙尺寸来实现的。

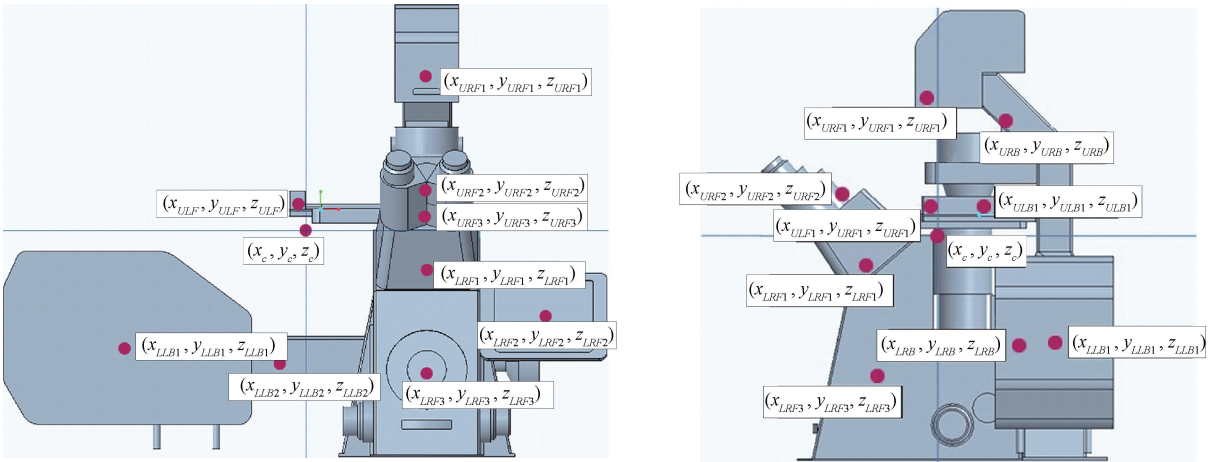


图4 显微镜节奏度参数
Fig.4 Microscope rhythm parameters

秩序度 OR_p 包含两部分, $RM_{alignment}$ 反映的是产品要素间的对齐关系; $RM_{spacing}$ 反映的是产品要素间的间隔一致性。其中 n_{xa}, n_{ya} 和 n_{za} 是产品要素在 X 轴、 Y 轴和 Z 轴方向上存在对齐的数量; $n_{spacing}$ 是在坐标轴方向间隔一致的元素对数; n 是产品要素数。

$$OR_p = 1 - (|RM_{alignment}| + |RM_{spacing}|) / 2 \quad (14)$$

其中,

$$RM_{alignment} = \begin{cases} 1, & n = 1 \\ 1 - \frac{n_{xa} + n_{ya} + n_{za}}{3n}, & n \neq 1 \end{cases} \quad (15)$$

$$RM_{spacing} = \begin{cases} 1, & n = 1 \\ 1 - \frac{n_{spacing} - 1}{2(n - 1)}, & n \neq 1 \end{cases}$$

1.7 色彩美度

色彩是人类感知世界和表达情感的重要方式。不同色相、明度、纯度属性带来无数种排列组合,人们在感知不同色彩时产生不同的心理变化。多种色彩的搭配带来更多不同的视觉体验。显微仪器产品可通过整体与局部的色彩关系组织来形成洁净、高级的视觉感受,以及突出局部功能的色彩搭配,形成统一的产品品牌形象,从而提升显微仪器产品质感。因此色彩美度(color, C)对于显微仪器产品美度评价也极其重要。显微仪器产品色彩美度基于色彩调和理论和伯克霍夫美度计算模型。式(16)中: C_o 为色彩秩序因子, C_c 为色彩复杂度因子; C_{oh} 为产品各个色彩之间色相差因子, C_{ov} 为产品各个色彩之间明度差因子, C_{oc} 为产品各个色彩之间纯度差因子; C_{cm} 为产品呈现的不同色彩总数, C_{ch} 为产品呈现的不同色相对数, C_{cn} 为产品呈现的不同明度对数, C_{cc} 为产品呈现的不同纯度对数。

$$C_p = \frac{C_o}{C_c} \quad (16)$$

2 显微仪器产品综合美度评价方法

为了较为准确全面地评价显微仪器产品美感,需要建立主客观相结合的综合评价方法;由于显微仪器产品美度评价的指标较多且每个指标的计算方法与取值标准存在一定的差异性;因此,选择模糊综合评价法对显微仪器产品进行美度综合评价。结合产品样本美度量化结果与调查问卷用户主观评价结果对各产品样本美度等级进行综合评价。

2.1 模糊综合评价模型的建立

模糊综合评价方法的基本数学模型如下,其中 W 代表评价指标的权重矩阵, R 代表模糊关系矩阵, B 代表评价结果向量。

$$B = W \circ R \quad (17)$$

式中:“ \circ ”代表模糊算子,代表某种模糊关系合成运算的数学计算方法。

选择模糊综合评价法时,需要根据显微镜产品综合美度评价特点建立综合评价模型。显微镜产品综合美度受7个评价指标(平衡度、对称度、比例度、节奏度、整体度、秩序度、色彩美度)的影响,因此需要先大致判断7个美度评价指标的主观评分是否具有独立性,以及7个美度评价指标主观评分对综合美感主观评分的影响大小。通过问卷调查获取用户主观评价结果。结合问卷调查的结果在SPSS软件中对7个美度指标主观评分进行双变量相关性分析。若7个评价指标之间相互独立,且7个美感意象(平衡美,对称美,比例美,节奏美,整体美,秩序美,色彩美)中,某一指标对

于整体美感都具有决定性的影响,则综合评价模型选择主因决定型算子,如式(18)所示。若7个评价指标之间相互独立,且7个美感意象(平衡美,对称美,比例美,节奏美,整体美,秩序美,色彩美)中,某几个指标对于整体美感都具有主要的影响,则综合评价模型选择主因突出型算子,如式(19)所示。若7个评价指标之间存在相关性,并非相互独立,且7个美感意象(平衡美,对称美,比例美,节奏美,整体美,秩序美,色彩美)对于整体美感都具有一定的影响,则综合评价模型选择加权平均型模糊算子,如式(20)所示。

$$B_k = \max\{\min(w_j, r_{jk}) \mid 1 \leq j \leq m\}, k = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

$$B_k = \max\{w_j \cdot r_{jk} \mid 1 \leq j \leq m\}, k = 1, 2, \dots, n \quad (19)$$

$$B_k = \min\left\{1, \sum_{j=1}^m w_j r_{jk}\right\}, k = 1, 2, \dots, n \quad (20)$$

2.2 显微仪器产品美度的模糊综合评价

显微镜产品的综合美度受7个美度指标影响且每个指标的计算方法与取值标准存在一定的差异性,按照5个等级划分评价结果,评价集划分为5个等级: $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\} = \{\text{很差, 较差, 一般, 较好, 很好}\}$ 。根据隶属度函数的选取原则,表达式为:

$$v_1 = \begin{cases} 1 & , 0 \leq x \leq 0.1 \\ 1 - 5(x - 0.1) & , 0.1 < x < 0.3 \\ 0 & , \text{其他} \end{cases}$$

$$v_2 = \begin{cases} 5(x - 0.1) & , 0.1 \leq x \leq 0.3 \\ 1 - 5(x - 0.3) & , 0.3 < x < 0.5 \\ 0 & , \text{其他} \end{cases}$$

$$v_3 = \begin{cases} 5(x - 0.3) & , 0.3 \leq x \leq 0.5 \\ 1 - 5(x - 0.5) & , 0.5 < x < 0.7 \\ 0 & , \text{其他} \end{cases}$$

$$v_4 = \begin{cases} 5(x - 0.5) & , 0.5 \leq x \leq 0.7 \\ 1 - 5(x - 0.7) & , 0.7 < x < 0.9 \\ 0 & , \text{其他} \end{cases}$$

$$v_5 = \begin{cases} 5(x - 0.7) & , 0.7 \leq x \leq 0.9 \\ 1 & , 0.9 < x \leq 1 \\ 0 & , \text{其他} \end{cases}$$

模糊综合评价的因素集 U , 即显微镜产品美度评价的因素集为{平衡美, 对称美, 比例美, 节奏美, 整体美, 秩序美, 色彩美}。在此基础上, 结合量化计算结果, 通过隶属度函数计算得到各指标的单因素评价向量, 再通过模糊评价公式分别计算得出产品的美度模糊评价矩阵 R , 最后由式(17)得出评价结果向量。

3 显微仪器产品美度评价案例

以蔡司、徕卡、尼康以及哈工大自行研制的激光共聚

焦生物显微镜为对象进行产品美度量化评价。4款显微镜样本如图5所示。

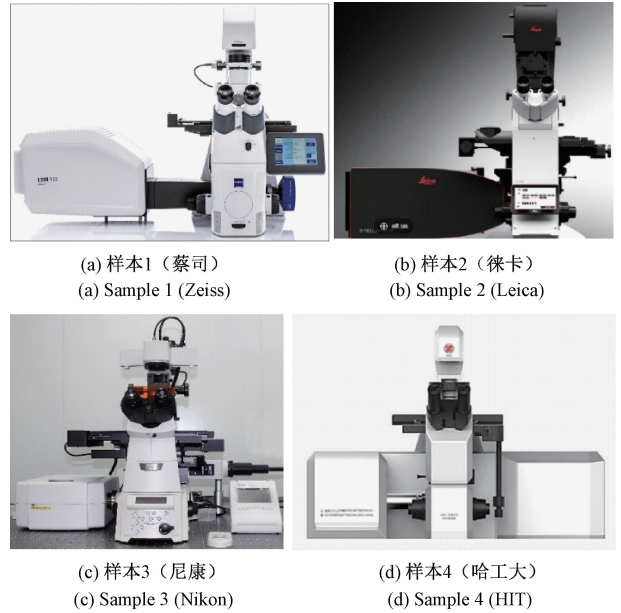


图5 激光共聚焦生物显微镜

Fig. 5 Laser confocal biomicroscope

3.1 样本美度指标量值分析

将四款显微镜样本通过 Pro/E 软件建模, 统一尺度单位, 获取产品重心坐标数据。通过 Pro/E 软件体积计算功能, 获取产品各部分坐标数据。在 Photoshop 软件中处理产品的正视图与侧视图, 将产品二维视图分割为不同区域, 并通过绘制与测量得出产品各个区域中心坐标数据, 如表1所示。

表1 样本美度指标计算值

Table 1 The calculated value of beauty indexes of samples

评价指标	样本1	样本2	样本3	样本4
平衡度	0.412	0.642	0.458	0.428
对称度	0.572	0.459	0.720	0.788
比例度	0.925	0.881	0.971	0.989
节奏度	0.615	0.580	0.697	0.787
整体度	0.438	0.354	0.442	0.589
秩序度	0.444	0.389	0.417	0.433
色彩美度	0.854	0.820	0.667	0.900

从表1可知, 样本4的美度测量评分最为突出, 其中对称度、比例度、节奏度、整体度、色彩美度5项指标的得分均高于其它样本; 样本2的平衡度、样本1的秩序度评分最高; 值得注意的是所有样本的比例度评分最高, 均高于0.8, 而整体度和秩序度两项的评分都较低, 其中样

本2的整体度和秩序度得分均低于0.4。由此可见,哈工大自主研发的高端显微仪器关注产品美学设计,与国际大牌同类产品相比甚至在某些方面表现更为优越;4款显微镜均在产品造型设计的比例关系、色彩配置方面的美感体现较为突出,使产品呈现和谐美感;由于受显微仪器产品自身功能结构复杂性的限制,其造型的整体度和秩序度不易把控。

针对显微仪器产品样本外观美感评价设计调研问卷,调研对象主要为显微镜设计者及操作者,就产品样本外观进行美感意象调查。要求答卷者对显微镜整体美感进行主观评价并打分,同时分别从产品的平衡美、对称美、比例美、节奏美、整体美、秩序美、色彩美7个维度进行主观评价并打分。针对问卷全部数据进行信度检验。采用检测 Cronbach's α 值的方法检测其信度及一致性。共53份样本量数据,信度检验结果也就是整体量表信度值为0.944>0.8,说明本次问卷信度较好。针对问卷中4个样本的7个美度指标评分进行双变量相关性分析,计算结果如表2所示。

表2 7个美度指标主观评分的相关性

Table 2 Correlation of subjective scoring for 7 items of beauty indexes

	平衡度	对称度	比例度	节奏度	整体度	秩序度	色彩美度
平衡度	1.000	0.719	0.645	0.545	0.609	0.598	0.428
对称度	0.719	1.000	0.504	0.363	0.462	0.484	0.325
比例度	0.645	0.504	1.000	0.635	0.658	0.640	0.535
节奏度	0.545	0.363	0.635	1.000	0.692	0.720	0.611
整体度	0.609	0.462	0.658	0.692	1.000	0.774	0.667
秩序度	0.598	0.484	0.640	0.720	0.774	1.000	0.651
色彩度	0.428	0.325	0.535	0.611	0.667	0.651	1.000

由表2可知,7个评价指标之间均存在相关性,并非相互独立。将问卷中4个样本的整体美观性与7个美度指标分别进行双变量相关性分析,结果如表3所示。

表3 4个样本综合美感评分与美度指标评分相关性

Table 3 Correlation of overall beauty scoring and beauty indexes scoring for four samples

综合	平衡	对称	比例	节奏	整体	秩序	色彩
样本1	0.588	0.378	0.434	0.544	0.640	0.550	0.481
样本2	0.447	0.386	0.434	0.468	0.655	0.670	0.576
样本3	0.570	0.506	0.640	0.645	0.683	0.597	0.624
样本4	0.516	0.467	0.387	0.509	0.556	0.604	0.444

由表3可知,4个样本的整体美感评分与7个指标的

评分在0.01级别均呈现显著的相关性。同时,表中皮尔逊相关性系数越大则说明相关性越强,表中皮尔逊相关性系数分布在0.378~0.683区间,说明7个美感意象(平衡美,对称美,比例美,节奏美,整体美,秩序美,色彩美)对于整体美感都具有一定的影响,每个指标的影响程度的差别不大。因此综合评价模型按式(20)选择加权平均型模糊算子。

3.2 样本美度的模糊综合评价

先计算模糊综合评价的因素集U和评价集V。结合量化计算结果,通过隶属度函数计算得到各指标的单因素评价向量,再通过模糊评价公式分别计算得出4个产品的美度模糊评价矩阵 R_1, R_2, R_3, R_4 。

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0.439 & 0.561 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6415 & 0.3585 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0.426 & 0.574 & 0 \\ 0 & 0.308 & 0.692 & 0 & 0 \\ 0 & 0.278 & 0.722 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.231 & 0.769 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.2915 & 0.7085 & 0 \\ 0 & 0.2035 & 0.7965 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0945 & 0.906 \\ 0 & 0 & 0.601 & 0.399 & 0 \\ 0 & 0.7315 & 0.2685 & 0 & 0 \\ 0 & 0.555 & 0.445 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4 & 0.6 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0.208 & 0.792 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.9015 & 0.909 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0.0155 & 0.9845 & 0 \\ 0 & 0.291 & 0.7095 & 0 & 0 \\ 0 & 0.417 & 0.583 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.8335 & 0.167 \end{bmatrix}$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0.3595 & 0.6405 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.562 & 0.438 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5665 & 0.4335 \\ 0 & 0 & 0.5575 & 0.4225 & 0 \\ 0 & 0.3335 & 0.6665 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

由问卷相关性分析结果数值确定样本指标权重。例如样本1的指标权重 W_1 为[0.588, 0.378, 0.434, 0.544, 0.64, 0.55, 0.481]通过式(17)计算即可得出4款产品的美度模糊综合评价结果。样本1(蔡司)模糊综合评价结果向量为:

$$B_1 = W_1 \circ R_1 = [0, 0.6082, 1.6441, 0.5588, 0.8039]$$

依据最大隶属度原则,对应评价结果为一般。样本2(徕卡)模糊综合评价结果向量为:

$$B_2 = W_2 \circ R_2 = [0, 0.9255, 1.1929, 0.7748, 0.7386]$$

依据最大隶属度原则,对应评价结果为一般。样本3(尼康)模糊综合评价结果向量为:

$$B_3 = W_3 \circ R_3 = [0, 0.5959, 1.0484, 1.5761, 0.7939]$$

依据最大隶属度原则,对应评价结果为较好。样本4(哈工大)模糊综合评价结果向量为:

$$B_4 = W_4 \circ R_4 = [0, 0.3534, 1.0425, 0.8883, 1.2562]$$

依据最大隶属度原则,对应评价结果为很好。

经过模糊综合评价,在平衡度、对称度、比例度、节奏度、整体度、秩序度、色彩度7个量化美度指标参与下,四款产品的综合评价结果分别为一般、一般、较好、很好。综合评价结果显示,在4个产品样本中哈工大自主研发的激光共聚焦生物显微镜的美度等级最高,其产品造型设计更注重构型的平衡、对称、比例、节奏的把控,以及产品色彩配置的功能性表现,从而使显微仪器产品设计具有更好的整体感与秩序性。

4 结 论

本文基于形式美法则,在Ngo和伯克霍夫美度计算模型的基础上,建立显微仪器产品美度指标及评价方法,主要结论如下。

1) 针对显微仪器产品特有的功能形态,构建了显微仪器产品造型的7个美度量化指标,即平衡度、对称度、比例度、节奏度、整体度、秩序度、色彩美度。

2) 综合考虑量化指标与主观审美认知,建立显微仪器产品美度模糊综合评价模型。通过用户主观评价结果分析得出显微仪器产品的综合美度受7个美度指标影响,且每个指标的计算方法与取值标准存在一定的差异性,故选择加权平均型模糊算子,建立计算显微仪器产品美度模糊评价矩阵 R 。

3) 以四款激光扫描共聚焦生物显微镜为例,通过显微仪器产品7个美度评价指标与模糊综合评价方法对上述4个产品样本外观美感进行主客观综合评价,得出定量的外观美感评价结果,最终实现了对显微仪器产品外观美感的量化评价。

显微仪器产品美度研究为国内首次,基于形式美法则构建的7个产品美度指标及其评价方法具有一定的普遍性,适用于相应特征的台式仪器产品,其建立为国内开展显微仪器产品的美学设计研究奠定了基础。

参考文献

- [1] BIRKHOFF G D. Aesthetic measure [M]. Cambridge: Harvard University Press, 1933: 3-6.
- [2] NGO D C L, LIAN S T, BYRNE J G. Modelling

interface aesthetics [J]. Information Sciences, 2003, 152(8): 25-46.

- [3] 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.
- [4] ZHENYU G, MING X T, JOHN H F. Capturing aesthetic intention during interactive evolution [J]. Computer-Aided Design, 2006, 38: 224-237.
- [5] 李永锋,朱丽萍. 基于模糊层次分析法的产品可用性评价方法 [J]. 机械工程学报, 2012, 48(14): 183-191.
- LI Y F, ZHU L P. Product usability evaluation method based on fuzzy analytic hierarchy process [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(14): 183-191.
- [6] 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 L, XUE CH Q, TANG W CH, et al. Aesthetic evaluation method of interface elements layout design [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphic, 2013, 25(5): 758-766.
- [7] 吕健,孙玮伯,潘伟杰,等. 基于认知特性的信息界面局美度评价 [J]. 包装工程, 2019, 40(18): 220-226.
- LYU J, SUN W B, PAN W J, et al. Evaluation of information interface layout beauty based on cognitive characteristics [J]. Packaging Engineering, 2019, 40(18): 220-226.
- [8] 李晓英,程帅,周大涛. 基于计算美学的实体界面美度评估方法 [J]. 包装工程, 2023, 44(17): 41-51.
- LI X Y, CHENG SH, ZHOU D T. Evaluation method of aesthetic image for man-machine interface form elements layout design [J]. Packaging Engineering, 2023, 44(17): 41-51.
- [9] 曾利,刘大鹏. 家具美度评价量化模型研究 [J]. 西北林学院学报, 2010, 25(1): 149-153.
- ZENG L, LIU D P. Quantification of furniture beauty evaluation [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(1): 149-153.
- [10] 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 J N, YANG W J, ZHANG SH T, et al.

- Comprehensive evaluation method of form aesthetic degree based on latent semantic analysis [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2018, 44(6): 39-43.
- [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 M, SU J N, YAN SH T, et al. Nonlinear information dynamics model of synthetic evaluation on product form aesthetic [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(15): 150-159.
- [12] 张书涛, 苏鹏飞, 杨文瑾, 等. 基于熵理论的产品美度综合评价方法 [J]. 包装工程, 2021, 42(8): 79-87.
- ZHANG SH T, SU P F, YANG W J, et al. Integrated evaluation method of product aesthetic based on entropy theory [J]. Packaging Engineering, 2021, 42(8): 79-87.
- [13] LIU P, WANG K, YANG K, et al. An aesthetic measurement approach for evaluating product appearance design [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, DOI:10.1155/2020/1791450.
- [14] SHIH W H, MENG H Y, CHU H L. An aesthetic measurement method for matching colors in product design [J]. Color Res Appl, 2017, 42:664-683.
- [15] MA M, CHEN C, WU F A. Design decision-making support model for customized product color combination [J]. Computers Industry, 2007, 58(6): 504-518.
- [16] 杨延璞, 陈登凯, 顾蓉, 等. 基于色彩案例和灰度关联分析的产品配色设计方法 [J]. 图形学报, 2016, 37(4): 509-513.

YANG Y P, CHEN D K, GU R, et al. Product color design method based on color case and grey relational analysis [J]. Journal of Graphics, 2016, 37(4): 509-513.

- [17] 何劲涛, 陈登凯, 余隋怀. 基于色彩调和理论的文化创意产品色彩设计与评价方法研究 [J]. 西北工业大学学报, 2020, 38(4): 766-772.

HE J T, CHEN D K, YU S H. Research on color design and evaluation method of cultural creative products based on color harmony theory [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2020, 38(4): 766-772.

作者简介



王勇, 2007年于哈尔滨工业大学获硕士学位, 2022年于哈尔滨工业大学获博士学位, 现为哈尔滨工业大学建筑与设计学院讲师, 主要研究方向为仪器产品人因学。

E-mail: wangyong77@hit.edu.cn

Wang Yong received her M. Sc. degree and Ph. D. degree all from Harbin Institute of Technology in 2007 and 2022 respectively. She is currently a lecturer in School of Architecture and Design at Harbin Institute of Technology. Her main research interest includes human factors engineering for instruments.



谭久彬 (通信作者), 现为中国工程院院士, 哈尔滨工业大学精密仪器工程研究院院长, 长期致力于高端装备制造中的超精密测量与仪器工程研究。

E-mail: jbtan@hit.edu.cn

Tan Jiubin (Corresponding author) is currently an academican of Chinese Academy of Engineering. He is the dean of the Precision Instrument Engineering Research Institute of Harbin Institute of Technology. He has long been committed to the research of ultra-precision measurement and instrument engineering of the high-end equipment manufacturing.