

# 基于感性工学的飞桥游艇造型灰关联度研究

张阳<sup>1b</sup>, 宋磊<sup>1b</sup>, 李学林<sup>2</sup>, 林海花<sup>1a</sup>, 孙洪源<sup>1a</sup>

(1.山东交通学院 a.船舶与港口工程学院 b.威海市游艇智能一体化设计工程技术研究中心,  
山东 威海 264209; 2.齐鲁工业大学 艺术设计学院, 济南 250353)

**摘要:** **目的** 为探究飞桥游艇造型演变趋势及各造型要素的重要度排序, 提高产品造型设计的效率。**方法** 提出 1 种基于感性工学 (Kansei Engineering) 及灰关联模型的游艇造型设计方法。通过收集飞桥游艇样本及感性语汇, 应用因子分析及聚类分析对飞桥游艇造型演变的阶段进行划分, 提取其中 1 个阶段较新的 27 个样本的结构线并归纳总结, 应用灰关联模型得到不同感性语汇下飞桥游艇各造型要素的重要度排序。**结果** 设计师可以根据所得的各造型要素重要度决定不同感性语汇下设计的优先度。**结论** 以用户需求为导向的产品设计可以依据该方法为设计师提供可参考的数据, 同时以感性工学为基础的游艇造型演变阶段划分, 可以避免已不被用户所接受的造型对后续结果的影响, 在提高飞桥游艇造型设计效率的同时能更好地贴合用户心理需求。  
**关键词:** 工业设计; 感性工学; 灰关联模型; 飞桥游艇; 造型要素  
**中图分类号:** TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)16-0180-08  
**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.16.018

## Grey Relational Analysis of Flybridge Yacht Modeling Based on Kansei Engineering

ZHANG Yang<sup>1b</sup>, SONG Lei<sup>1b</sup>, LI Xue-lin<sup>2</sup>, LIN Hai-hua<sup>1a</sup>, SUN Hong-yuan<sup>1a</sup>

(1.a.Naval Architecture and Port Engineering College, b.Weihai Yacht Intelligent Integrated Design Engineering  
Technology Research Center, Shandong Jiaotong University, Shandong Weihai 264209, China;  
2.School of Art and Design, Qilu University of Technology, Jinan 250353, China)

**ABSTRACT:** The work aims to explore the evolution trend of flybridge yacht modeling and the importance priority of various modeling elements and improve the efficiency of modeling design. A yacht modeling design method based on Kansei engineering and grey relational model was proposed. Through collection of flybridge yacht samples and perceptual vocabulary, factor analysis and cluster analysis were used to divide the flybridge yacht modeling evolution into different stages, and the structure lines of 27 newer samples in one stage were extracted and summarized, and then grey relational analysis was applied to obtain the priority ranking of various modeling elements of flybridge yacht under different perceptual vocabulary. Designers could decide the priority of design under different perceptual vocabulary according to the importance of each modeling element. User-oriented product design can provide designers with reference data based on this method. At the same time, the stage division of yacht modeling evolution based on Kansei engineering can avoid the impact of modeling that is not accepted by users on subsequent results. While improving the design efficiency of flybridge yacht, it can better meet the psychological needs of users.

**KEY WORDS:** industrial design; Kansei engineering; grey relational analysis; flybridge yacht; modeling element

收稿日期: 2023-03-09

基金项目: 国家自然科学基金 (51909148)

作者简介: 张阳 (1993—), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向为工业设计理论与方法、游艇邮轮外观造型及内装设计。

通信作者: 宋磊 (1981—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为数字及智能化造船、船舶与海洋工程建模与仿真。

飞桥游艇是集餐饮娱乐、旅游垂钓、休闲住宿于一身的多功能休闲豪华游艇。由于其价值介于运动游艇与超级游艇之间, 受众群体更广泛, 因此飞桥游艇外观造型的优劣更直接地决定着用户心中的购买导向。由于飞桥游艇造型在演变过程具有多样性, 不仅传统方法很难进行划分, 而且以用户为导向的设计也较难界定。因此, 本文引入感性工学 (Kansei Engineering) 与灰关联模型, 探究飞桥游艇的造型发展趋势及各造型要素的模糊关联度。

目前, 感性工学广泛应用于游艇造型设计中, DOĞAN 等<sup>[1]</sup>通过运用 GMDH 神经网络模型确定感性语汇与游艇艇体造型的关系, 并期望通过模型建立客户与设计师的沟通途径, 达到感性语汇的改变对应艇体造型的变化这个目的。KHAN 等<sup>[2]</sup>创造了 1 种新的以用户为中心的最优游艇艇体造型生成与交互设计方法, 该方法可以根据用户的多次交互逐步生成可以达到用户满意度的游艇艇体造型设计方案。樊佳爽等<sup>[3]</sup>将工业设计云服务平台应用在游艇造型设计的多目标决策中, 并建立了 1 种评价目标体系, 帮助用户进行个性化的游艇造型定制。程永胜等<sup>[4]</sup>提出了 1 种以感性意象为导向的游艇造型设计方法, 以重要的感性词汇来指导游艇造型设计工作。陈国强等<sup>[5]</sup>以感性工学理论为基础, 构建了儿童陪伴机器人的感性意象空间, 并依据感性语汇对其进行了造型设计。由上述文献可知, 感性工学已被广泛应用于各类产品造型设计中<sup>[6-8]</sup>, 但设计师依据特定的感性意象, 再次对产品进行全面造型设计是复杂的, 组成产品的各个造型要素有其对应的优先度排序, 设计师依据优先度有选择性地针对特定要素着重设计, 使之能更好地贴合感性意象, 减少工作量的同时提高了设计的效率与造型的准确性。

据此, 结合灰关联分析, 建立感性语汇与飞桥游艇造型要素的模糊关联模型, 目的在于得到不同感性语汇下游艇造型要素的优先度排序, 使设计师可以有所侧重地进行造型设计, 提高游艇造型设计效率的同时能更好地贴合用户的心理需求。

## 1 基于感性工学的飞桥游艇造型设计路径

在评价产品造型的优劣时, 用户的主观评判往往起着决定性作用。因此, 设计师如何提前把握用户的需要, 设计出符合的产品造型则显得尤为重要, 感性工学便因此应运而生。日本学者 Mitsuo Nagamachi 倡导了感性工学的发展, 并定义其为 1 种将人所期望的感性或意象予以定量并转化为设计要素的方法<sup>[9]</sup>。将感性工学应用于飞桥游艇造型设计, 解构其造型要素, 通过灰关联模型建立在不同感性语汇下的飞桥游艇造型要素优先度关系, 流程模型如图 1 所示。

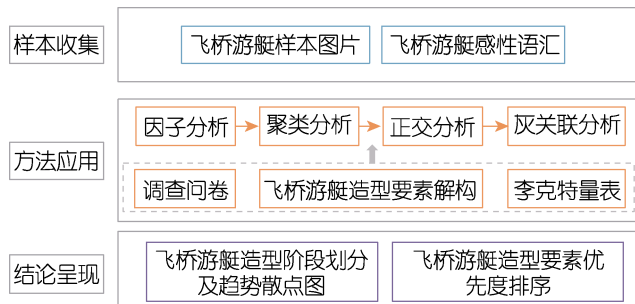


图 1 飞桥游艇造型要素优先度模型

Fig.1 Priority model for modeling elements of flybridge yacht

模型共分为 3 层, 具体如下。

1) 样本来源层。通过文献、书籍、网站广泛收集样本和感性语汇, 通过专家访谈、焦点小组法进行初步的筛选, 得到初始样本库。

2) 方法应用层。因子分析降维感性语汇, 聚类分析划分游艇样本, 结合李克特量表的调查问卷构建感性意象空间。进一步获取精准的样本库进行造型要素的解构, 灰关联模型分析飞桥游艇造型要素优先度。

3) 结论呈现层。通过散点趋势图, 分析飞桥游艇造型演变的特点; 通过灰关联模型获得飞桥游艇在不同感性语汇下造型要素的优先度。

通过上述模型, 可以建立飞桥游艇与感性语汇间的关系表达, 并通过因子分析与聚类分析划分出游艇样本的造型趋势, 进而选择同组样本进行后续灰关联模型计算, 使造型要素优先度排序更精确, 避免造型差异过大带来的结果误差, 进一步地向设计师展示用户的感性需求导向, 探讨人的感性与产品设计要素的关系。

## 2 飞桥游艇造型感性意象空间构建

### 2.1 飞桥游艇造型样本与感性语汇收集

为了对飞桥游艇造型发展脉络有更清晰的了解, 首先通过各类游艇公司网站、相关报告、文献、书籍等广泛收集 17~22 m 的 80 个飞桥游艇样本, 并依据生产时间进行排序, 见图 2。所收集飞桥游艇样本图片基本为游艇侧面视图, 且对样本图片进行了灰阶处理, 以防止色彩对视觉产生干扰, 影响对游艇造型的判断。对于感性语汇的收集则通过企业走访、专家访谈及小组讨论的方式, 将从文献、报刊、报告等文章中找到的关于描述飞桥游艇的 60 组形容词进行筛选, 最终确定了 12 组感性语汇对, 见表 1。

### 2.2 感性语汇因子分析

为使后续工作简化并精确结果, 对 80 个样本数据下的 12 组感性语汇对进行因子分析, 将感性语汇进行降维, 提取有代表性的变量进行后续工作。以 80 个样本与 12 对感性语汇对为依据制作五阶李克特量表, 向

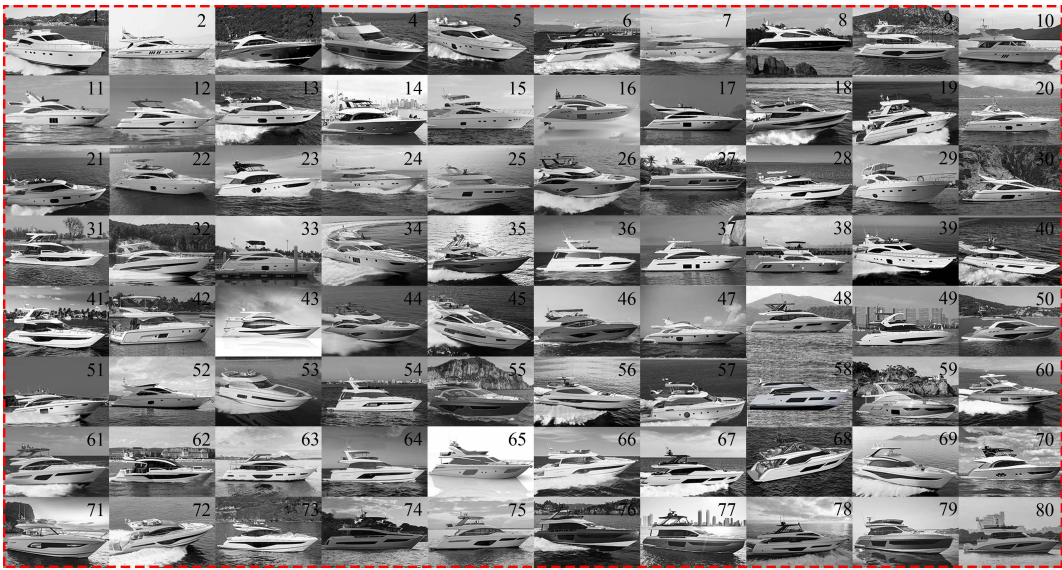


图 2 飞桥游艇 80 个样本  
Fig.2 80 samples of flybridge yacht

表 1 描述飞桥游艇的感性语汇对  
Tab.1 Perceptual vocabulary to describe flybridge yachts

| 序号 | 感性语汇对   | 序号 | 感性语汇对   |
|----|---------|----|---------|
| 1  | 科技的-古典的 | 7  | 独特的-普通的 |
| 2  | 豪华的-朴素的 | 8  | 速度的-平稳的 |
| 3  | 张扬的-含蓄的 | 9  | 精致的-大众的 |
| 4  | 轻快的-厚重的 | 10 | 和谐的-突兀的 |
| 5  | 威严的-亲切的 | 11 | 浪漫的-实际的 |
| 6  | 雄伟的-小巧的 | 12 | 高级的-简约的 |

高校船舶专业教师、游艇企业工程师发放调查问卷各 10 份，收回 20 份，并将所得数据进行平均值处理，导入 SPSS 19.0 软件中进行数据处理。首先，检验变量间的相关性，见表 2。其中 KMO（Kaiser-Meyer-Olkin）是用于比较变量间简单相关系数和偏相关系数的指标，其取值为 0~1，KMO 的值越接近 1 则意味着变量间的相关性越强，原有变量越适合做因子分析。本次所得 KMO 值为 0.854，表明对本组数据进行因子分析是适合的。

表 2 KMO 与 Bartlett 鉴定  
Tab.2 Verification by KMO and Bartlett

|                            |         |
|----------------------------|---------|
| Kaiser-Meyer-Olkin 测量取样适当性 | 0.854   |
| Bartlett 的球形检定             | 312.296 |
| df                         | 66      |
| 显著性                        | 0.000   |

继续对数据进行因子分析，得到的总方差解释，见表 3。12 个因子中只有 3 个因子的特征值大于 1，且前 3 个因子的累计贡献度达到 79.7%，接近 80%。因此，提取 3 个公共因子作为 12 个因子的代表性变量。为了更好地解释在分析过程中得到的公共因子，对上述数据进行旋转，旋转后得到的成分矩阵，见表 4。各公共因子中绝对值越大则越具有代表性，公共因

子 1 中，“精致的”“高级的”“浪漫的”“豪华的”“威严的”“雄伟的”“和谐的”为 1 组，其中“精致的-大众的”数值最大；公共因子 2 中，“张扬的”“科技的”“独特的”为 1 组，其中“张扬的-含蓄的”数值最大；公因子 3 中，“轻快的”“速度的”为 1 组，其中“轻快的-厚重的”数值最大。因此，依据表 3 与表 4 所得数据，最终选择 3 对感性语汇对：“精致的-大众的”“张扬的-含蓄的”“轻快的-厚重的”作为后续研究的代表性变量。

表 3 总方差解释  
Tab.3 Total variance explained

| 因子 | 起始特征值 |        |         |
|----|-------|--------|---------|
|    | 统计    | 方差/%   | 累加/%    |
| 1  | 6.105 | 50.877 | 50.877  |
| 2  | 2.142 | 17.854 | 68.731  |
| 3  | 1.316 | 10.970 | 79.701  |
| 4  | 0.798 | 6.650  | 86.351  |
| 5  | 0.570 | 4.750  | 91.101  |
| 6  | 0.356 | 2.969  | 94.070  |
| 7  | 0.222 | 1.851  | 95.921  |
| 8  | 0.177 | 1.476  | 97.397  |
| 9  | 0.125 | 1.039  | 98.436  |
| 10 | 0.096 | 0.799  | 99.235  |
| 11 | 0.054 | 0.453  | 99.688  |
| 12 | 0.037 | 0.312  | 100.000 |

2.3 飞桥游艇样本的聚类分析

为了对飞桥游艇样本的造型进行阶段划分并选取适合的阶段进行后续灰关联分析，需要对 80 个游艇样本进行聚类分组。选取“精致的-大众的”“张扬的-含蓄的”“轻快的-厚重的”3 组感性语汇对对应的上述调查问卷结果进行聚类分析，得到组间链接聚类树状图（如图 3 所示）。根据横坐标各组间距离可对

表 4 旋转后的成分矩阵  
Tab.4 Component matrix after rotation

| 成分      | 公共因子   |        |        |
|---------|--------|--------|--------|
|         | 1      | 2      | 3      |
| 精致的-大众的 | 0.928  | -0.119 | 0.105  |
| 高级的-简约的 | 0.883  | 0.243  | 0.108  |
| 浪漫的-实际的 | 0.879  | 0.019  | 0.156  |
| 豪华的-朴素的 | 0.870  | 0.123  | 0.309  |
| 威严的-亲切的 | 0.768  | 0.095  | 0.271  |
| 雄伟的-小巧的 | 0.768  | 0.419  | 0.140  |
| 和谐的-突兀的 | 0.644  | -0.328 | 0.336  |
| 张扬的-含蓄的 | 0.144  | 0.859  | 0.338  |
| 科技的-古典的 | 0.350  | 0.774  | 0.230  |
| 独特的-普通的 | -0.306 | 0.717  | -0.344 |
| 轻快的-厚重的 | 0.168  | 0.043  | 0.906  |
| 速度的-平稳的 | 0.291  | 0.217  | 0.845  |

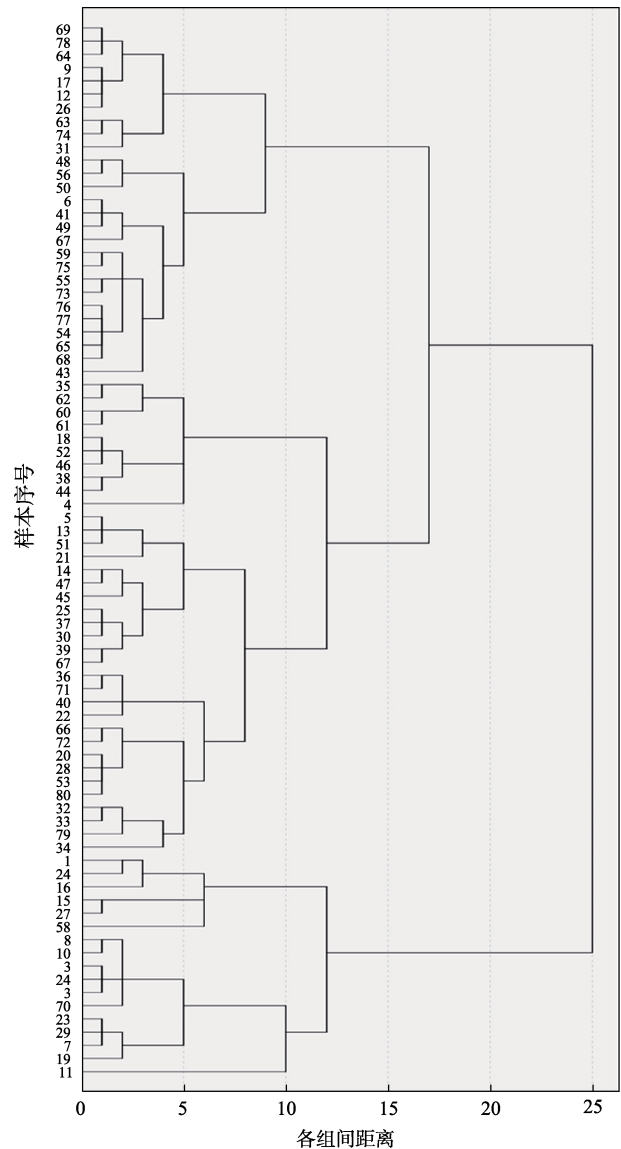


图 3 飞桥游艇 80 个样本组间连接树状图  
Fig.3 Connection tree diagram of 80 sample groups of flybridge yacht

样本进行分组, 由图 3 可知, 当距离选择为 10、15、20 时, 可将样本划分为 6 组、3 组、2 组, 为方便后续计算及设计归纳, 本次通过聚类分析选择横坐标为 15 的距离做竖线将 80 个样本划分为 3 组。

3 飞桥游艇造型感性意象空间构建

根据上述分析结果, 最终将 80 个飞桥游艇样本依据其自身造型分为 3 组。为得到造型随时间演变的趋势, 对结果进一步做可视化处理, 得到飞桥游艇造型趋势散点图 (如图 4 所示)。由图 4 中可以看出, 游艇造型的演变并非完全依据时间的发展, 但总体依然可以依据趋势线的走向判断, 且各分组间样本的聚集程度也可通过散点图得出。

据此, 选择第 3 组游艇样本作为后续飞桥游艇造型要素灰关联分析的样本库。为避免因部分飞桥游艇造型在演变过程中已经不被用户所接受而对最终结果造成干扰, 进一步地选择飞桥游艇造型趋势较为接近的分组使结果更准确且具备可信度。

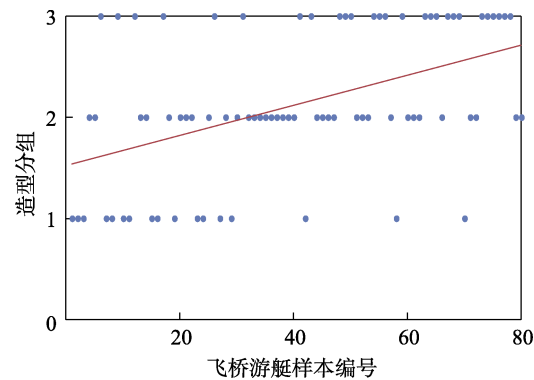


图 4 飞桥游艇造型趋势散点图  
Fig.4 Scatterplot of flybridge yacht modeling trend

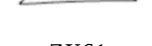
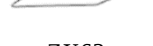
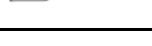
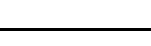
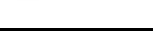
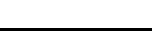
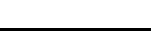
4 飞桥游艇造型设计的灰关联分析

4.1 飞桥游艇造型要素分解

依据上述内容获得飞桥游艇样本 27 个, 提取飞桥游艇样本侧视图结构特征线, 进行造型要素的分解。通过专家访谈和焦点小组法, 对所提取的各样本特征线进行归纳分类, 共确认 6 种造型要素与 26 种类目, 得到如表 5 所示的飞桥游艇造型要素类目。

由表 5 中数据可以最终组合出 5 625 种不同的飞桥游艇样本。应用正交分析, 可在 5 625 种样本中选出代表性实验样本进行后续灰关联分析。将上述数据导入 SPSS 19.0 软件中, 得到如表 6 所示的代表性样本共 25 个。每个样本对应了不同造型要素下具体的类目, 据此通过 Rhino 软件将上述 25 个样本进行快速建模 (如图 5 所示) 并进行第 2 次调查问卷。

表 5 飞桥游艇造型要素类目  
Tab.5 Flybridge yacht modeling elements category

| 造型要素   | 类目 1                                                                                | 类目 2                                                                                | 类目 3                                                                                | 类目 4                                                                                  | 类目 5                                                                                  |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| ZX1    | ZX11                                                                                | ZX12                                                                                | ZX13                                                                                |                                                                                       |                                                                                       |
| 艇体下型线  |    |    |    |                                                                                       |                                                                                       |
| ZX2    | ZX21                                                                                | ZX22                                                                                | ZX23                                                                                | ZX24                                                                                  | ZX25                                                                                  |
| 艇体上型线  |    |    |    |    |    |
| ZX3    | ZX31                                                                                | ZX32                                                                                | ZX33                                                                                | ZX34                                                                                  | ZX35                                                                                  |
| 上建型线   |    |    |    |    |    |
| ZX4    | ZX41                                                                                | ZX42                                                                                | ZX43                                                                                |                                                                                       |                                                                                       |
| 折叠蓬型线  |    |    |    |                                                                                       |                                                                                       |
| ZX5    | ZX51                                                                                | ZX52                                                                                | ZX53                                                                                | ZX54                                                                                  | ZX55                                                                                  |
| 上建舷窗型线 |    |    |    |    |    |
| ZX6    | ZX61                                                                                | ZX62                                                                                | ZX63                                                                                | ZX64                                                                                  | ZX65                                                                                  |
| 艇体舷窗型线 |  |  |  |  |  |

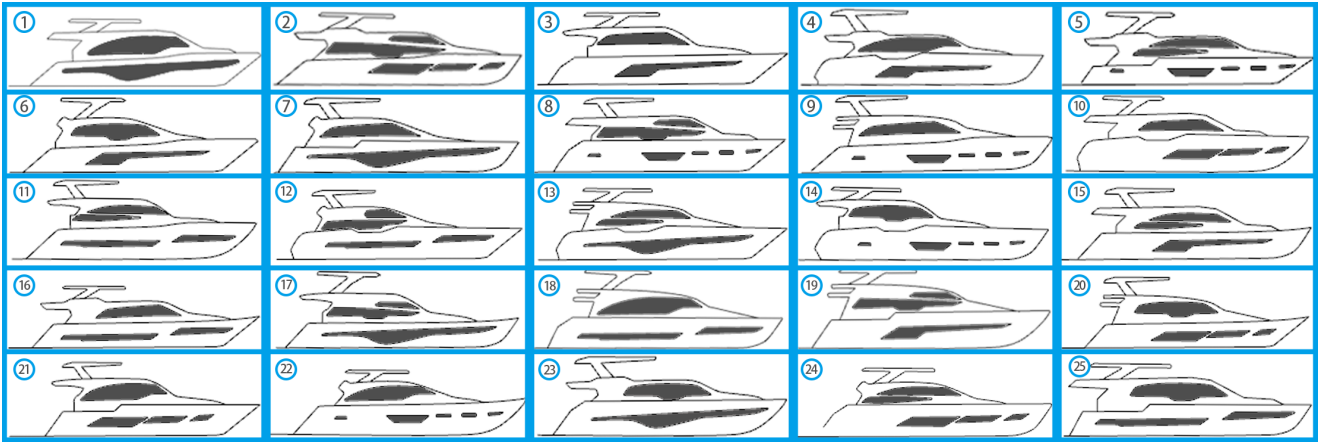


图 5 25 个飞桥游艇样本  
Fig.5 25 flybridge yacht samples

问卷再次选择感性语汇对：“精致的-大众的”“张扬的-含蓄的”和“轻快的-厚重的”作为描述样本的感性意象，配合五阶李克特量表，对 25 个飞桥游艇样本进行调查。问卷发放同样选择船舶专业教师 10 名和游艇企业工程师 10 名，整理问卷结果并取均值后得到数据，见表 6。

4.2 飞桥游艇造型要素灰关联分析

灰关联分析是灰色系统理论中的重要组成内容，由中国学者邓聚龙<sup>[10]</sup>于 1982 年创立并在多个学科领域中广泛应用。通过灰关联度的计算，对系统特征及相关因素排序，进行优先度分析。目前，灰关联分析已经逐渐成为为设计师提供设计决策的工具<sup>[11-13]</sup>。灰关联分析

是指将系统数据投影至几何空间中，从而测量几何形状的接近程度，借此判断各造型要素的优劣<sup>[14]</sup>。

为得到飞桥游艇各造型要素对感性语汇的影响程度，进行各造型要素对感性评价结果的灰关联分析。设上述飞桥游艇造型要素类目矩阵  $D$ ，其计算见式（1）—（2）。

$$D=[x_i(k)]_{ik}$$
 (1)

$$x_i(k)=[x_i(1),x_i(2),\cdots,x_i(n)]$$
 (2)

其中： $i=0,1,2,\cdots,m,m\in N$ ； $k=1,2,\cdots,n,n\in N$ 。

设  $x_0(k)$  为参考序列，此处选择“精致的-大众的”为参考序列，其余  $m$  组造型要素序列为比较序列，每个序列各包含  $n$  个因子。对矩阵进行正规化处理，正

表 6 各样本造型要素类目矩阵  
Tab.6 Matrix of modeling element category for each sample

| 样本 | ZX1  | ZX2  | ZX3  | ZX4  | ZX5  | ZX6  | 精致的-大众的 | 张扬的-含蓄的 | 轻快的-厚重的 |
|----|------|------|------|------|------|------|---------|---------|---------|
| 1  | 1.00 | 3.00 | 2.00 | 1.00 | 3.00 | 2.00 | 4.32    | 3.28    | 2.24    |
| 2  | 2.00 | 3.00 | 5.00 | 1.00 | 5.00 | 4.00 | 2.32    | 1.26    | 2.42    |
| 3  | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 4.32    | 3.28    | 2.32    |
| 4  | 2.00 | 5.00 | 5.00 | 2.00 | 3.00 | 1.00 | 3.32    | 2.34    | 3.28    |
| 5  | 1.00 | 4.00 | 5.00 | 3.00 | 4.00 | 5.00 | 2.28    | 1.28    | 2.32    |
| 6  | 1.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 2.00 | 1.00 | 4.32    | 4.24    | 1.24    |
| 7  | 2.00 | 4.00 | 3.00 | 2.00 | 1.00 | 2.00 | 4.3     | 4.28    | 4.2     |
| 8  | 1.00 | 1.00 | 2.00 | 2.00 | 5.00 | 5.00 | 3.28    | 3.3     | 2.32    |
| 9  | 2.00 | 3.00 | 4.00 | 2.00 | 1.00 | 5.00 | 4.38    | 4.28    | 3.26    |
| 10 | 3.00 | 5.00 | 2.00 | 3.00 | 1.00 | 4.00 | 1.42    | 3.38    | 3.34    |
| 11 | 3.00 | 3.00 | 1.00 | 2.00 | 4.00 | 3.00 | 3.36    | 3.26    | 4.36    |
| 12 | 1.00 | 5.00 | 3.00 | 2.00 | 5.00 | 3.00 | 1.34    | 2.3     | 3.28    |
| 13 | 1.00 | 5.00 | 4.00 | 1.00 | 4.00 | 2.00 | 2.32    | 1.24    | 2.38    |
| 14 | 2.00 | 5.00 | 1.00 | 1.00 | 2.00 | 5.00 | 3.28    | 3.3     | 2.28    |
| 15 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 4.00 | 1.00 | 4.3     | 2.32    | 2.28    |
| 16 | 1.00 | 2.00 | 5.00 | 1.00 | 1.00 | 3.00 | 4.34    | 4.3     | 1.26    |
| 17 | 2.00 | 2.00 | 1.00 | 3.00 | 5.00 | 2.00 | 3.28    | 2.28    | 3.24    |
| 18 | 2.00 | 1.00 | 4.00 | 3.00 | 3.00 | 3.00 | 3.32    | 3.34    | 3.28    |
| 19 | 3.00 | 4.00 | 4.00 | 1.00 | 5.00 | 1.00 | 2.26    | 1.24    | 4.3     |
| 20 | 1.00 | 2.00 | 4.00 | 2.00 | 2.00 | 4.00 | 2.28    | 3.26    | 2.26    |
| 21 | 1.00 | 4.00 | 1.00 | 2.00 | 3.00 | 4.00 | 3.26    | 2.32    | 4.3     |
| 22 | 3.00 | 2.00 | 3.00 | 1.00 | 3.00 | 5.00 | 3.28    | 3.42    | 1.2     |
| 23 | 3.00 | 1.00 | 5.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.28    | 4.34    | 2.26    |
| 24 | 2.00 | 1.00 | 3.00 | 1.00 | 4.00 | 4.00 | 1.32    | 2.3     | 1.38    |
| 25 | 2.00 | 4.00 | 2.00 | 1.00 | 2.00 | 3.00 | 2.26    | 2.36    | 3.44    |

规化矩阵  $S$ ，其计算见式（3）。

$$S=[x_i^*(k)]_{ik}=[\frac{x_i(k)}{\frac{1}{n}\sum_{k=1}^nx_i(k)}]_{ik}$$

(3)

式中： $i=0,1,2,\cdots,m,m\in N$ 。

将正规化矩阵  $S$  中每 1 横列都减去参考序列  $x_0(k)$  并取绝对值，即可得差序列矩阵  $\Delta$ ，见式（4）。

$$\Delta=\begin{bmatrix}|x_1^*(1)-x_0^*(1)|&|x_1^*(2)-x_0^*(2)|&\cdots&|x_1^*(n)-x_0^*(n)|\\|x_2^*(1)-x_0^*(1)|&|x_2^*(2)-x_0^*(2)|&\cdots&|x_2^*(n)-x_0^*(n)|\\&\cdots&&\cdots\\|x_m^*(1)-x_0^*(1)|&|x_m^*(2)-x_0^*(2)|&\cdots&|x_m^*(n)-x_0^*(n)|\end{bmatrix}$$

(4)

得到的差序列矩阵  $\Delta$  进一步计算灰关联系数，见式（5）。

$$\gamma[x_0(k),x_i(k)]=\frac{A_{\min}+\xi A_{\max}}{A_{0i}(k)+\xi A_{\max}}$$

(5)

式中： $A_{\max}=\max_i\max_k|x_i^*(k)-x_0^*(k)|$  为最大值；

$A_{\min}=\min_i\min_k|x_i^*(k)-x_0^*(k)|$  为最小值； $A_{0i}(k)=|x_i^*(k)-x_0^*(k)|$ ； $\xi$  为辨识系数（Distinguished Coefficient）， $\xi\in[0,1]$ ，一般建议给定 0.5<sup>[15]</sup>，辨识系数的主要功能为调整 2 物体之间的对比程度，其值大小可依据实际需要做适当调整，灰关联系数  $\gamma[x_0(k),x_i(k)]$  即为参考序列与比较序列的相关程度，其范围为  $0\leq\gamma[x_0(k),x_i(k)]\leq 1$ 。

将得到的灰关联系数代入公式计算灰关联度，灰关联度为灰关联系数的平均值，见式（6）。

$$\gamma(x_0,x_i)=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^n\gamma[x_0(k),x_i(k)]$$

(6)

由此可以计算得出各造型要素的灰关联度大小，即当  $\gamma(x_0,x_i)>\gamma(x_0,x_j)$  成立时，则表示  $x_i(k)$  对  $x_0(k)$  的灰关联度大于  $x_j(k)$  对  $x_0(k)$  的灰关联度。最终得到如表 7 所示的“精致的-大众的”的结果。

表 7 不同感性语汇下造型要素优先度排序  
Tab.7 Prioritization of modeling elements under different perceptual vocabularies

| 感性语汇对   | 造型要素 | $\xi=0.5$ | 排序 | $\xi=0.4$ | 排序 | $\xi=0.3$ | 排序 | $\xi=0.2$ | 排序 | $\xi=0.1$ | 排序 |
|---------|------|-----------|----|-----------|----|-----------|----|-----------|----|-----------|----|
| 精致的-大众的 | ZX1  | 0.640     | 2  | 0.598     | 2  | 0.544     | 2  | 0.470     | 3  | 0.358     | 3  |
|         | ZX2  | 0.589     | 4  | 0.542     | 4  | 0.482     | 4  | 0.402     | 4  | 0.284     | 4  |
|         | ZX3  | 0.576     | 6  | 0.528     | 6  | 0.468     | 6  | 0.387     | 6  | 0.270     | 6  |
|         | ZX4  | 0.667     | 1  | 0.626     | 1  | 0.572     | 1  | 0.496     | 1  | 0.380     | 1  |
|         | ZX5  | 0.632     | 3  | 0.593     | 3  | 0.542     | 3  | 0.472     | 2  | 0.363     | 2  |
|         | ZX6  | 0.582     | 5  | 0.536     | 5  | 0.476     | 5  | 0.397     | 5  | 0.280     | 5  |
| 张扬的-含蓄的 | ZX1  | 0.713     | 1  | 0.673     | 1  | 0.618     | 1  | 0.538     | 1  | 0.410     | 1  |
|         | ZX2  | 0.637     | 5  | 0.591     | 5  | 0.531     | 5  | 0.448     | 5  | 0.322     | 5  |
|         | ZX3  | 0.685     | 4  | 0.643     | 4  | 0.586     | 4  | 0.504     | 4  | 0.372     | 4  |
|         | ZX4  | 0.689     | 3  | 0.648     | 3  | 0.594     | 3  | 0.517     | 2  | 0.395     | 2  |
|         | ZX5  | 0.620     | 6  | 0.574     | 6  | 0.515     | 6  | 0.434     | 6  | 0.310     | 6  |
|         | ZX6  | 0.696     | 2  | 0.654     | 2  | 0.597     | 2  | 0.516     | 3  | 0.384     | 3  |
| 轻快的-厚重的 | ZX1  | 0.754     | 1  | 0.722     | 1  | 0.678     | 1  | 0.616     | 1  | 0.515     | 1  |
|         | ZX2  | 0.701     | 3  | 0.662     | 3  | 0.609     | 3  | 0.535     | 3  | 0.420     | 3  |
|         | ZX3  | 0.617     | 6  | 0.574     | 6  | 0.519     | 6  | 0.444     | 6  | 0.335     | 6  |
|         | ZX4  | 0.717     | 2  | 0.680     | 2  | 0.631     | 2  | 0.563     | 2  | 0.458     | 2  |
|         | ZX5  | 0.662     | 4  | 0.621     | 4  | 0.567     | 4  | 0.494     | 4  | 0.383     | 4  |
|         | ZX6  | 0.635     | 5  | 0.593     | 5  | 0.539     | 5  | 0.465     | 5  | 0.356     | 5  |

通过表 7 中可以得出,在“精致的-大众的”感性语汇对下,造型要素 ZX4 折叠篷型线重要度最高,其次为 ZX1 艇体下型线、ZX5 上建舷窗型线,而造型要素 ZX2、ZX3 和 ZX6 所得值过于接近,可能会影响设计师进行决策。由于辨识系数  $\xi$  的数值大小具有强化或弱化各关联度的对比作用,辨识系数的值越小,则各关联度对比越强<sup>[16]</sup>。因此为进一步精确结果,再次计算了  $\xi$  取值为 0.4、0.3、0.2、0.1 时的结果,综合结论在  $\xi$  取值 0.2 和 0.1 时,优先度第 2 和第 3 的位次发生了变化,其余并未有改变。因此,在“精致的-大众的”感性语汇对下,造型要素优先度依次为:折叠篷型线、艇体下型线、上建舷窗型线、艇体上型线、艇体舷窗型线、上建型线。

用同样的步骤再次计算了感性语汇对“张扬的-含蓄的”和“轻快的-厚重的”影响下飞桥游艇造型要素的优先度排序。在“张扬的-含蓄的”感性语汇对下,造型要素优先度依次为:艇体下型线、艇体舷窗型线、折叠篷型线、上建型线、艇体上型线、上建舷窗型线。在“轻快的-厚重的”感性语汇对下,造型要素优先度依次为:艇体下型线、折叠篷型线、艇体上型线、上建舷窗型线、艇体舷窗型线、上建型线。

依据上述结果,可以为设计师在设计飞桥游艇造型时提供有针对性的参考,如用户需要飞桥游艇体现“精致的”,则设计师可着重对飞桥游艇的折叠篷、艇体下型线样式、上建舷窗进行详细的造型设计,从而可以更有效地体现飞桥游艇精致的感性意象,避免了设计师为体现某一意象而对飞桥游艇进行整体设

计,减小了设计工作量的同时提升了设计的效率,间接地加快了飞桥游艇生产的时间,提高了产品的市场竞争力。

5 结语

飞桥游艇在发展演变过程中,造型的多样化使设计师很难划分其阶段并有针对性地特定结构进行造型设计。本文结合飞桥游艇造型特点,将感性工学应用于飞桥游艇造型要素的优先度研究中。作者收集了 80 个 17~22 m 飞桥游艇样本,感性词汇对 12 对,并以此进行了第 1 次调查问卷,获得的数据整理后通过因子分析及聚类分析将 80 个飞桥游艇样本划分为 3 组,通过散点图与趋势线得出游艇造型的演变并非完全按照时间顺序,但总体趋势是不断进化的。最终选择了 27 个造型阶段较新的飞桥游艇样本,避免了飞桥游艇的某些造型在演变过程中已不被用户所接受而影响后续的结果。论文提取了 27 个飞桥游艇样本的侧视图结构线,并归纳总结了 6 个造型要素和 26 种类目,通过正交分析重组了代表性样本 25 个,并以此进行了第 2 次调查问卷。整理数据后通过灰关联分析最终获得了不同感性语汇对下造型要素的重要度排序。与以往游艇设计流程相较,通过此方法设计师可以进一步依据不同的感性语汇对对飞桥游艇的部分结构进行设计,而不是整体的造型设计,有效地缩短设计周期并减少了设计的工作量,提高造型设计的效率。

在后期研究中,可以采用更多的回归分析方法,研究飞桥游艇特定结构的不同种类的造型在感性语汇影响下的重要度。设计师可直接选取在不同特征下飞桥游艇可以采用的造型形式,并形成一定的数据库,在方便调用的同时增加智能化水平。此举有望完全替代人工设计,从而智能化地设计出符合用户需求的飞桥游艇造型方案。

#### 参考文献:

- [1] DOGAN M, GUNPINAR E. Learning Yacht Hull Adjectives and Their Relationship With Hull Surface Geometry Using GMDH-type Neural Networks for Human Oriented Smart Design[J]. Ocean Engineering, 2017, 145: 215-229.
- [2] KHAN S, GUNPINAR E, SENER B. GenYacht: An Interactive Generative Design System For Computer-aided Yacht Hull Design[J]. Ocean Engineering, 2019, 191: 106462.
- [3] 樊佳爽,余隋怀,初建杰,等.面向工业设计云服务平台的多目标创意设计评价方法[J].计算机集成制造系统,2019,25(1):173-181.  
FAN Jia-shuang, YU Sui-huai, CHU Jian-jie, et al. Multi-objective Creative Design Evaluation Method for Industrial Design Cloud Service Platform[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 173-181.
- [4] 程永胜,徐骁琪,陈国强.基于品牌意象的游艇造型设计方法[J].中国舰船研究,2020,15(5):63-68.  
CHENG Yong-sheng, XU Xiao-qi, CHEN Guo-qiang. Yacht Modeling Design Method Based on Brand Image[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2020, 15(5): 63-68.
- [5] 陈国强,姜楠,张鹏,等.基于感性工学的儿童陪伴机器人造型设计[J].包装工程,2021,42(4):166-171.  
CHEN Guo-qiang, JIANG Nan, ZHANG Peng, et al. Modeling of Children's Companion Robot Based on Perceptual Engineering[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(4): 166-171.
- [6] 王园园,蒋超,俞琳,等.基于感性工学和视觉意象的机械产品表面涂装质感设计方法[J].包装工程,2022,43(6):56-61.  
WANG Yuan-yuan, JIANG Chao, YU Lin, et al. Method of Mechanical Products Surface Coating Texture Design Based on Kansei Engineering and Visual Imagery[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(6): 56-61.
- [7] 陈金亮,赵锋,李毅,等.基于感性工学的产品设计方法研究[J].包装工程,2019,40(12):162-167.  
CHEN Jin-liang, ZHAO Feng, LI Yi, et al. Product Design Method Based on Kansei Engineering[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(12): 162-167.
- [8] 刘永红,刘磊.基于感性工学的陶瓷酒瓶造型设计研究[J].包装工程,2021,42(20):330-340.  
LIU Yong-hong, LIU Lei. Modeling Design of Ceramic Liquor Bottle Based on Kansei Engineering[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(20): 330-340.
- [9] NAGAMACHI M. Kansei Engineering: A New Ergonomic Consumer-oriented Technology for Product Development[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 1995,15(1):3-11.
- [10] 邓聚龙.灰色控制系统[J].华中工学院学报,1982,10(3):9-18.  
DENG Ju-long. The Grey Control System[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1982, 10(3): 9-18.
- [11] 宁廷州,葛美芹.考虑用户共识的包装机械色彩意象模糊优选方法[J].包装工程,2020,41(4):171-176.  
NING Ting-zhou, GE Mei-qin. Fuzzy Evaluation Method for Packaging Machinery Color Image Design by Considering Users' Consensus[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(4): 171-176.
- [12] 苏建宁,黄凯,张书涛,等.基于灰色关联理论的产品意象设计参数辨识方法[J].兰州理工大学学报,2012,38(6):20-23.  
SU Jian-ning, HUANG Kai, ZHANG Shu-tao, et al. Parameter Identification Method for Product Image Design Based on Grey Relational Theory[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2012, 38(6): 20-23.
- [13] 李永锋,邢艳芳,朱丽萍.基于灰色系统理论的产品意象造型设计研究[J].包装工程,2010,31(14):43-46.  
LI Yong-feng, XING Yan-fang, ZHU Li-ping. Research on Form Design of Product Image Based on Grey System Theory[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(14): 43-46.
- [14] 谭学瑞,邓聚龙.灰色关联分析:多因素统计分析新方法[J].统计研究,1995,12(3):46-48.  
TAN Xue-rui, DENG Ju-long. Grey Relational Analysis: A New Method of Multi-factor Statistical Analysis[J]. Statistical Research, 1995, 12(3): 46-48.
- [15] Deng J L. Introduction Grey System Theory[J]. Journal of Grey System, 1989, 1(1): 191-243.
- [16] 吕锋.灰色系统关联度之分辨系数的研究[J].系统工程理论与实践,1997,17(6):49-54.  
LYU Feng. Research on the Identification Coefficient of Relational Grade for Grey System[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 1997, 17(6): 49-54.

责任编辑:蓝英侨