

基于主成分层次分析的产品设计语义差分评价研究

陈永超, 邵永凯, 安琦
(天津工业大学, 天津 300387)

摘要: **目的** 以外观设计评价为研究对象, 提出一种语义差分评价方法。**方法** 运用主成分分析法, 对初始多维语义进行主成分提取, 得出综合语义指标和分值, 再通过层次分析法构建综合语义指标的主观评价矩阵, 最终得出综合语义分值。**结论** 针对46款热销女士洗发水瓶的外观设计样本, 实现了语义差分评价。运用主成分—层次分析—语义差分评价的方法, 实现了近似语义的归类。依据综合语义权值, 得出了语义差分分值, 并适用于较大样本的外观设计评价。

关键词: 产品外观; 语义差分; 评价; 主成分分析; 层次分析

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)22-0138-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.22.023

Semantic Differential of Product Design Evaluation Based on Principal Component Analysis and Analytic Hierarchy Process Hierarchy Process

CHEN Yong-chao, SHAO Yong-kai, AN Qi
(Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a semantic differential evaluation method with the form design evaluation as the research object. Principal component analysis was used to extract principal component from original multi-dimensional semantics to obtain the synthetical semantic indexes and scores. Then, by the analytic hierarchy process, the subjective evaluation matrix of synthetical semantic indexes was constructed to finally obtain the synthetical semantic scores. The design of semantic differential evaluation with respect to the 46 hot-sale ladies' shampoo bottles is realized. The principal component-analytic hierarchy process-semantic differential evaluation method is applied to achieve the classification of similar semantics. According to the synthetical semantic weights, the semantic differential scores are obtained and applicable for the appearance design evaluation of larger samples.

KEY WORDS: product form; semantic differential; evaluation; principal component analysis, analytic hierarchy process

产品外观设计意象属于隐性知识, 设计师和用户对其认知存在较大差异^[1-3]。相较于用户的离散性和具象性, 设计师对产品意象的认知体现出连续性和抽象性。本文提出一种基于语义差分的分析方法, 将用户对产品外观的感性认知转化为设计师的理性思维, 为设计师提供产品评价的方法。语义差分法作为心理学的研究范畴, 适合于解构不易表达的技能、技巧、经验等知识, 该方法由 Osgood 提出, 通过语义词汇描述感性意象, 并根据 Likert 量表标定心理反应^[4]。目前语义差分法已被广泛应用于工业设计评价^[5]。主

成分分析法适合解决线性多维相关指标的决策问题, 能够在最大限度地保留初始数据信息的基础上, 将初始指标转化为综合指标, 实现数据降维^[6]。层次分析法常用于决策、分析中, 通过主观评价量化, 构建多层次的隶属关系与主观评价矩阵, 得出评价指标权值。如今, 将主成分分析法和层次分析法相结合, 从而构建评价体系的方法, 已被多领域广泛应用^[7]。基于以上研究与应用, 将用户对产品外观的语义评价数据进行主成分分析, 得出综合语义指标, 再根据专业外观设计评议, 构建综合语义指标的主观评价矩阵,

收稿日期: 2018-07-12

基金项目: 2016年天津市艺术科学规划重点项目: 基于对接“一带一路”战略的京津冀一体化文化发展战略研究(E16029)

作者简介: 陈永超(1985—), 男, 黑龙江人, 硕士, 天津工业大学讲师, 主要从事工业设计方面的研究。

最后得出综合语义评价指标的加权分值,实现用户感性认知向设计师理性思维的转化。这个方法可应用于外观设计评价^[8]。

1 原理

1.1 主成分分析模型

设有综合语义指标 $F_i (i=1, 2, \dots, m)$, 系数 $a_{ij} (j=1, 2, \dots, n)$, ($m \leq n$) 初始指标变量 x_j 。则综合语义指标与指标变量的线性组合为:

$$\begin{cases} F_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \\ F_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \\ \dots \\ F_m = a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \end{cases} \quad (1)$$

式中: 系数 a_{ij} 满足: $a_{i1}^2 + a_{i2}^2 + \dots + a_{in}^2 = 1$; 且由于各个综合语义评价指标间相互独立, 则 $Cov(F_i, F_j) = 0, (i \neq j)$ 。按照主成分方差递减, 即 $Var(F_1) \geq Var(F_2) \geq \dots \geq Var(F_m)$ 方式, 构建初始指标变量的协方差矩阵:

$$C = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{1n} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{2n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \sigma_{n1} & \sigma_{n2} & \sigma_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

若该矩阵对角线外元素不全为 0, 则指标变量存在相关性。对于矩阵特征根 η_i , 规定 $\eta_1 \geq \eta_2 \geq \dots \geq \eta_i$, 则 $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_i$ 分别为主成分 F_1, F_2, \dots, F_m 的方差, $a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}$ 分别为其对应的的特征向量。则第 k 个综合语义指标的累计贡献率为:

$$V_{i=k} = \sum_{i=1}^k \eta_i / \sum_{i=1}^n \eta_i \times 100\% \quad (3)$$

综合语义评价指标载荷为:

$$L = \sqrt{\eta_i} a_{ij} \quad (4)$$

综合语义评价指标分值为:

$$F_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j' \quad (5)$$

式中: x_j' 为中心化的指标变量。主成分分析的条件为: 样本数据的 KMO 统计量和 $Batlett$ 球形统计量满足: $KMO \rightarrow 1$, 且显著性水平 $P < 0.05$ 。

1.2 层次分析模型

参考 Satty“1-9”分制标度, 以综合语义指标 F_i 构建主观评价矩阵 P 。

$$P = \begin{bmatrix} 1 & \frac{W_1}{W_2} \dots \frac{W_1}{W_m} \\ \frac{W_2}{W_1} & 1 \dots \frac{W_2}{W_m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{W_m}{W_1} & \frac{W_m}{W_2} \dots 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

如果 P 为一致性矩阵, 则满足:

$$PW = \lambda_{max} W \quad (7)$$

式中: λ_{max} 为矩阵 P 的最大特征根;

W 为 λ_{max} 对应的特征向量。

则, 特征向量 W 即为综合语义指标的权值向量。

可基于幂法求解 λ_{max} 和 W 。矩阵 P 的一致性检验指标为:

$$C \cdot I = \frac{\lambda_{max} - m}{m - 1} \quad (8)$$

当 $\lambda_{max} = m$ 时, 有 $C \cdot I = 0$, P 为完全一致性。 $C \cdot I$ 值越大, 主观判断矩阵 P 完全一致性越差, 以特征向量作为权向量而引起的误差就越大。一般认为: $C \cdot I < 0.1$ 时, 主观判断矩阵 P 的一致性较好。

1.3 样本综合语义评价算法

对于容量为 g 的综合语义分值样本 $F_{(g, m)}$, 指标权值向量为 W , 则最终评价分值为:

$$E = F_{(g, m)} \times W \quad (9)$$

2 语义评分标准的应用

2.1 数据来源

以女士洗发水瓶设计为对象, 选取 46 款现阶段热销产品, 见图 1。根据对消费者的初步调研, 搜集了 56 个语义词汇。经筛选, 选取其中 11 个作为初始语义指标, 分别为圆润、稚嫩、活泼、律动、饱满、妖娆、高挑、奢华、优雅、文静、温柔。采用 5 分制, 对初始语义进行感性量化标定, 语义评分标准见图 2。由 30 名被测用户对单个语义指标进行评分, 取得评分均值, 构成初始语义样本。46 款热销女士洗发水瓶语义评分样本见表 1。

2.2 语义评价指标主成分分析

对样本数据的 KMO 和 $Bartlett$ 检验显示: 统计量 $KMO=0.568$, 显著性水平 $P < 0.05$, 满足主成分分析的适用条件^[9-10]。

由 (1) — (3) 式, 得出 11 个初始语义的累计贡献率, 取特征值大于 1 的 4 个主成分作为综合评价指标, 见图 3。最后得出, 累计贡献率为 84.145%, 能够较好地解释原始数据信息, 旋转成分特征值与贡献率见表 2。

由 (4) 式得出初始语义指标与综合语义评价指标之间的相关性, 结果显示: 第 1 项综合语义与圆润、稚嫩、活泼强正相关, 与律动弱正相关; 第 2 项综合语义与饱满、妖娆强正相关; 第 3 项综合语义与奢华、优雅强正相关; 第 4 项综合语义与文静、温柔强正相关。上述 4 项综合语义反映出用户对洗发水瓶外观设计的综合感性认知, 可概括为: 可爱、性感、尊贵、内秀。由 (5) 式进一步得出综合语义分值矩阵 $F_{(46, 4)}$ 成分矩阵见表 3。



图1 46款热销女士洗发水
Fig.1 46 Hot ladies shampoos

表1 46款热销女士洗发水瓶语义评分样本
Tab.1 Sample of 46 hot ladies' shampoos

编号	饱满	高挑	活泼	可爱	律动	奢华	温柔	文静	妖娆	优雅	圆润
1	1.467	2.400	1.500	1.900	2.567	3.033	3.900	3.667	1.467	3.000	1.867
2	2.467	1.567	1.433	2.833	1.400	2.000	1.533	1.533	2.633	2.267	2.933
3	2.500	2.133	3.367	3.233	2.933	1.600	3.333	2.967	2.533	1.533	2.900
4	3.500	1.000	3.433	4.267	1.867	1.000	3.333	3.367	3.433	1.000	4.067
5	1.933	2.033	1.433	1.333	1.233	1.800	3.967	3.733	2.033	2.000	1.533
6	2.700	1.533	2.100	4.133	2.633	1.500	3.467	3.500	2.700	1.467	4.100
7	1.000	3.867	1.000	1.000	1.000	3.033	2.600	2.633	1.000	3.000	1.000
8	1.000	4.500	1.600	2.967	3.200	2.100	3.700	3.600	1.000	2.133	2.700
9	1.367	3.500	1.533	3.000	1.467	1.467	2.533	2.433	1.333	1.367	3.133
10	1.500	2.767	1.500	1.333	2.000	4.000	3.667	3.967	1.533	3.933	1.567
11	1.900	1.467	2.233	1.600	3.467	2.867	2.567	2.233	2.100	2.767	1.433
12	1.000	2.967	2.933	1.933	2.600	3.900	3.633	3.367	1.000	4.067	2.167
13	2.933	1.000	1.000	1.000	1.500	1.433	1.467	1.433	2.933	1.467	1.000
14	2.567	1.300	1.867	1.667	3.700	2.200	2.467	2.500	2.600	1.900	1.933
15	1.633	3.800	1.667	1.533	1.533	1.400	4.600	4.533	1.533	1.433	1.433
16	1.500	2.567	1.467	1.467	1.433	1.300	2.933	3.133	1.633	1.567	1.467
17	3.833	1.567	2.867	2.833	3.933	1.000	2.600	2.533	4.167	1.000	3.033
18	3.633	1.000	2.533	3.167	2.433	1.467	3.400	3.500	3.567	1.600	2.933
19	1.900	1.800	3.500	4.000	1.467	3.933	2.467	2.433	1.900	3.867	4.200
20	1.500	1.567	2.433	1.533	3.667	2.033	2.467	2.567	1.300	2.067	1.533
21	1.933	1.933	3.500	2.100	2.333	3.167	1.433	1.567	1.933	2.900	2.300
22	2.467	2.567	2.967	2.100	3.500	3.467	1.467	1.733	2.533	3.600	2.200
23	1.000	3.533	2.333	1.467	3.667	1.633	2.500	2.333	1.000	2.100	1.500
24	1.467	2.533	1.000	1.500	1.000	2.500	1.500	1.633	1.467	2.500	1.467

续表

编号	饱满	高挑	活泼	可爱	律动	奢华	温柔	文静	妖娆	优雅	圆润
25	1.333	2.967	2.500	3.167	3.567	1.933	4.100	3.800	1.467	2.033	2.867
26	3.400	1.000	3.467	3.800	1.900	2.533	3.567	3.433	3.633	2.333	3.800
27	1.433	1.400	1.000	2.000	2.300	1.467	1.467	1.633	1.433	1.533	2.000
28	1.500	1.633	1.000	2.133	1.567	2.133	2.000	1.667	1.933	2.000	1.800
29	1.000	2.400	1.467	1.867	2.433	3.100	1.700	1.400	1.000	2.733	2.033
30	1.000	1.433	2.467	1.600	2.533	4.100	1.500	1.433	1.000	3.967	1.367
31	2.067	1.000	1.733	3.767	3.467	1.533	3.000	2.967	1.800	1.500	3.900
32	3.967	1.000	3.400	3.300	3.967	3.433	1.500	1.533	3.900	3.333	3.067
33	1.000	1.533	4.067	4.433	2.267	2.700	3.033	3.033	1.000	2.433	4.467
34	3.200	1.367	1.000	1.000	2.400	1.467	1.600	1.667	3.100	1.467	1.000
35	2.833	1.000	3.067	4.133	2.567	3.467	2.100	2.033	2.967	3.500	4.100
36	1.400	4.067	2.433	2.767	3.033	1.367	2.533	2.567	1.600	1.400	3.100
37	1.000	1.267	1.600	4.267	3.767	2.833	2.467	2.533	1.000	3.067	3.933
38	3.000	1.433	3.633	3.133	2.567	1.567	2.100	2.100	2.833	1.433	2.933
39	2.633	3.133	1.600	1.000	1.567	2.567	1.500	1.567	2.533	2.533	1.000
40	2.900	1.000	1.000	1.533	1.000	1.000	1.567	1.567	2.733	1.000	1.367
41	1.633	4.567	1.433	1.467	2.400	1.700	1.533	1.533	1.667	1.567	1.633
42	4.000	1.000	2.233	2.200	3.300	1.933	1.600	1.500	4.267	2.033	2.167
43	1.000	4.567	1.667	1.533	2.367	1.433	2.967	3.233	1.000	1.467	1.367
44	3.033	3.433	2.867	2.133	3.233	3.500	3.667	4.033	2.967	3.500	1.700
45	3.967	1.000	4.133	3.000	2.333	3.000	2.833	3.000	4.100	3.000	3.000
46	3.100	2.033	2.500	1.433	1.367	2.533	3.100	3.300	3.133	2.433	1.500

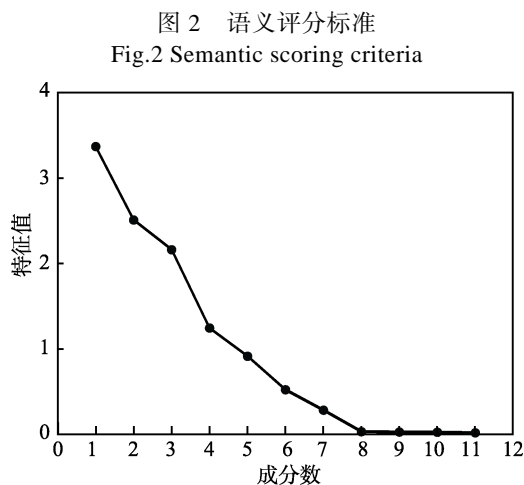
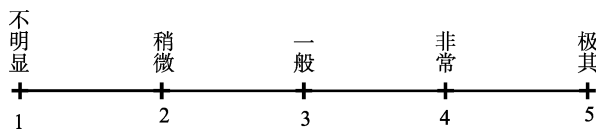


表 2 旋转成分特征值与贡献率
Tab.2 Component eigenvalue value and contribution rate

主成分	特征值	贡献率 (%)	累积贡献率 (%)
1	2.541	23.100	23.100
2	2.529	22.994	46.094
3	2.098	19.073	65.167
4	2.087	18.977	84.145
5	0.905	8.226	92.371
...

表 3 成分矩阵
Tab.3 The matrix of rotating components

初始语义评价指标	综合语义评价指标			
	1	2	3	4
圆润	0.948	0.115	-0.065	0.104
稚嫩	0.948	0.130	-0.073	0.122
活泼	0.618	0.401	0.356	0.210
律动	0.463	0.023	0.114	-0.025
饱满	0.077	0.976	-0.104	-0.023
妖娆	0.080	0.974	-0.095	-0.026
高挑	-0.325	-0.637	-0.004	0.331
奢华	0.067	-0.080	0.982	-0.047
优雅	0.052	-0.096	0.981	-0.023
文静	0.093	-0.069	-0.019	0.982
温柔	0.122	-0.102	-0.040	0.970

2.3 层次分析

组织工业设计领域专家 5 人和有 5 年以上从业经验的职业工业设计师 8 人，共 13 人组成评议组，其中女性 7 人，男性 6 人。对 4 项综合语义，以每两项语义的相对重要性比较法，按 9 分制标定，要求评议组给出一致性结果，最后构建出综合语义指标主观评

价矩阵, 见表4。

表4 综合语义指标主观评价矩阵
Tab.4 Subjective matrix of synthetical semantics evaluation indexes

	可爱	性感	尊贵	内秀
可爱	1.000	0.333	0.200	0.333
性感	3.000	1.000	0.500	0.500
尊贵	5.000	2.000	1.000	4.000
内秀	3.000	2.000	0.250	1.000

表5 设计语义评价分值结果
Tab.5 Semantics score

编号	分值	编号	分值	编号	分值	编号	分值	编号	分值	编号	分值	编号	分值
44	1.378	35	0.656	18	0.114	39	-0.062	17	-0.236	16	-0.488	41	-0.806
10	1.113	22	0.631	7	0.096	42	-0.067	29	-0.243	31	-0.551	9	-0.867
45	1.103	46	0.624	33	0.083	15	-0.124	6	-0.256	28	-0.554	40	-0.934
12	1.081	30	0.582	5	0.056	37	-0.128	38	-0.273	34	-0.555	27	-0.995
19	0.857	1	0.504	25	0.035	20	-0.171	23	-0.402	43	-0.616		
32	0.809	21	0.299	3	-0.034	4	-0.181	24	-0.402	13	-0.653		
26	0.693	11	0.252	14	-0.059	8	-0.211	2	-0.420	36	-0.675		

3 结语

通过构建用户的感性评价样本, 运用主成分分析法, 将用户的感性认知进行概括, 获得综合语义评价指标分值矩阵; 基于层次分析法, 由专业评议组提出主观评价矩阵, 通过幂法运算, 得出权值向量; 由综合语义分值矩阵与权值向量相乘, 得出最终评价分值。本方法实现了从用户感性认知到设计师理性思维的转化。在评价程序中, 有效区分了综合语义间的差异, 为进一步层次分析提供了必要条件。本文提出的方法, 可以有效地应用于工业设计和产品设计的语义评价中。

参考文献:

- [1] 罗仕鉴, 翁建广. 产品设计中基于群体文化学的隐性知识表达[J]. 机械工程学报, 2008, 44(4): 15—20.
LUO Shi-jian, WENG Jian-guang. Tacit Knowledge Representation Based on Group Culturology in Product Design[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(4): 15—20.
- [2] 罗仕鉴, 潘云鹤, 朱上上. 产品设计中基于图解思维的隐性知识表达[J]. 机械工程学报, 2007, 43(6): 93—98.
LUO Shi-jian, PAN Yun-he, ZHU Shang-shang. Patterns of Tacit Knowledge Based on Graphic Thinking in Product Design[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(6): 93—98.
- [3] 罗仕鉴, 潘云鹤. 产品设计中的感性意象理论、技术

由(6)—(7)式得: $\lambda_{max}=4.1873$, $W=(0.075, 0.185, 0.514, 0.226)$; 由(8)式对表4进行一致性检验, 得出 $C.I.=0.0715$, 说明主观评价矩阵的一致性较好。

2.4 评价向量计算

由综合语义分值矩阵 F 、权值向量 W , 根据(9)式, 得出46款热销女士洗发水瓶外观设计评价向量, 设计语义评价分值结果见表5(由大到小排序)。

与应用研究进展[J]. 机械工程学报, 2007, 43(3): 8—13.
LUO Shi-jian, PAN Yun-he. Review of Theory, Key Technologies and Its Application of Perceptual Image in Product Design[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(3): 8—13.

- [4] OSGOOD C E, SUCI C J, TANNENBAUM P H. The Measurement of Meaning[M]. Urbana: University of Illinois Press, 1957.
- [5] 朱上上, 罗仕鉴, 赵江洪. 基于人机工程的数控机床造型意象尺度研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2000, 12(11): 873—875.
ZHU Shang-shang, LUO Shi-jian, ZHAO Jiang-hong. Preliminary Study on Form Image Scale of Numerical Controlled Machine Tool Based on Human Factors[J]. Journal of Computer Aided Design and Computer Graphics, 2000, 12(11): 873—875.
- [6] 王黎静, 曹琦琰, 莫兴智, 等. 民机驾驶舱内饰设计感性评价研究[J]. 机械工程学报, 2000, 12(11): 873—875.
WANG Li-jing, CAO Qi-yan, MO Xing-zhi, et al. Study of Users' Kansei on Commercial Aircraft Cockpit Interior Design[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 12(11): 873—875.
- [7] 赵江洪, 欧静, 张军. 色彩意象尺度在数控机床 ICAID 系统中的研究及应用[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2004, 31(6): 83—86.
ZHAO Jiang-hong, OU Jing, ZHANG Jun. Study and Application of Color Image Scale of NC Machine Tools in ICAID System[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2004, 31(6): 83—86.

- [8] 孙琳琳, 孔繁森, 周宇, 等. 基于感性工学的汽车座椅静态舒适度的研究[J]. 人类工效学, 2013, 19(2): 60—62.
SUN Lin-Lin, KONG Fan-sen, ZHOU Yu, et al. Research on the Comfort of Carseats Based on Kansei Engineering[J]. Chinese Journal of Ergonomics, 2013, 19(2): 60—62.
- [9] 窦金花. 基于语义差分法的残疾人助行器设计研究[J]. 机械设计, 2014, 31(6): 118—121.
DOU Jin-hua. Design and Research of Walker for Disabled People Based on Semantic Differential Method[J]. Journal of Machine Design, 2014, 31(6): 118—121.
- [10] 苏畅, 付黎明, 魏君, 等. 基于感性工学和主成分分析的车身色彩设计[J]. 计算机辅助设计与图形学学报(工学版), 2016, 46(5): 1414—1419.
SU Chang, FU Li-ming, WEI Jun, et al. Body Color Design Based on Kansei Engineering and Principal Component Analysis[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2016, 46(5): 1414—1419.