

基于 DSM 和 GA 的消费者感性需求聚类^{*}

杨延璞, 余隋怀, 陈登凯, 李 博, 戚 彬

(西北工业大学 工业设计研究所, 西安 710072)

摘 要: 为了实现对消费者复杂的感性需求降维, 提出了一种基于设计结构矩阵 (design structure matrix, DSM) 和遗传算法 (genetic algorithms, GA) 的消费者感性需求聚类方法。通过分析消费者感性需求的特点, 以 DSM 模型建立感性需求之间的关系矩阵, 通过行列元素变换实现聚类操作。在对感性需求 DSM 模型染色体编码的基础上构建了适应度函数, 以遗传操作的方式寻找最优感性需求聚类方案。最后以电动滑板车的消费者感性需求聚类为例, 验证了所提方法的有效性。结果表明, 该方法能够提高消费者感性需求聚类的效率和聚类水平。

关键词: 感性需求; 设计结构矩阵; 遗传算法; 聚类

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2014)01-0055-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2014.01.012

Consumer's perceptual needs clustering based on DSM and GA

YANG Yan-pu, YU Sui-huai, CHEN Deng-kai, LI Bo, QI Bin

(Institute of Industrial Design, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: To reduce the complexity of consumer's perceptual needs, this paper proposed a clustering method based on DSM and GA. By analyzing the characteristics of consumer's perceptual needs, it constructed the DSM model for perceptual needs clustering by transforming the ranks of matrix elements. Based on encoding chromosome of the DSM model, it built the fitness function to find the optimal clustering scheme of consumer's perceptual needs through genetic manipulation. Finally, it validated the method by an example of consumer's perceptual needs clustering of electric scooter. The results show that this method can improve the efficiency and level of consumer's perceptual needs clustering.

Key words: perceptual needs; DSM; GA; clustering

0 引言

消费者的感性需求是一系列心理活动的结果, 反映了其对产品造型的情感期望, 影响着其对产品造型的意象感知, 进一步影响着消费者的购买行为。然而消费者的感性需求具有模糊性和复杂性的特点, 因此, 如何挖掘消费者的感性需求, 通过分析和聚类对其进行降维处理, 在产品造型设计过程中为设计师提供更为准确的设计依据, 是工业设计领域的重要议题^[1]。

目前, 常用的聚类方法可以分为层次聚类 (hierarchical clustering) 和划分聚类 (partitional clustering)^[2]。其中, 层次聚类是将数据对象组成一棵聚类的树, 可分为自底向上凝聚式聚类和自顶向下分裂式聚类; 划分聚类是将数据对象划分为多个部分, 每个部分为一个簇, 最常用的是 K-均值法。如 Kyungmee 等人^[3]以层次聚类方法对产品表面触感形容词对进行聚类, 通过构建评价函数寻找最优聚类数目; 周美玉等人^[4]以划分聚类方法构建了聚类模型, 对产品造型设计元素层次分解, 建立与感性意象之间的聚类模型与适应关系; 同时, Guha 等人^[5]提出用模糊聚类算法来处理不确定性数据。然而消费者的感性需求具有认知空间复杂和模糊的特点。例如, 对于感性需求“自由的”和“舒适的”, 一些研究人员认为可以合并成“自由

的”, 然而另外一些研究人员则认为“自由的”可以引起“舒适的”, 但“舒适的”却并不一定是“自由的”^[6]。因此, 应用现有聚类方法对感性需求聚类时, 会存在以下问题^[7]:

a) 应用层次聚类方法时, 会随着感性需求的层次展开, 忽略感性簇之间相对较弱的关系, 从而可能导致聚类结果可靠度不高。

b) 感性词汇是模糊的, 且其映射不具有连续性, 从而妨碍划分聚类方法的应用。

c) 虽然模糊聚类算法可以处理感性数据, 但是在实际应用时难以准确定义感性形容词的隶属度函数。

针对以上问题, 本文利用设计结构矩阵 (DSM) 发现不同感性需求之间的关系, 通过对 DSM 模型的行列元素变换实现感性需求聚类。同时, 引入遗传算法 (GA) 对 DSM 模型中的元素编码并构建适应度函数, 以遗传操作的方式提高 DSM 感性需求聚类的效率, 并寻找最优的感性需求聚类。最后以电动滑板车的消费者感性需求聚类为例对所提方法进行了应用验证。

1 消费者感性需求的特点

消费者的感性需求受到多重因素的影响, 如文化背景、个人经历、生活经验等, 并且随着消费者所处环境的不同而存在

收稿日期: 2013-04-16; 修回日期: 2013-05-26 基金项目: 国家“863”计划资助项目 (2006AA04Z111)

作者简介: 杨延璞 (1984-), 男, 河南南阳人, 博士研究生, 主要研究方向为产品创新设计、知识管理等 (thomasyang2005@126.com); 余隋怀 (1962-), 男, 吉林通化人, 教授, 博导, 主要研究方向为计算机辅助工业设计、数字化设计艺术等; 陈登凯 (1975-), 男, 陕西榆林人, 副教授, 博士, 主要研究方向为产品创新设计、设计策略与管理等; 李博 (1983-), 男, 陕西榆林人, 博士研究生, 主要研究方向为计算机辅助工业设计; 戚彬 (1980-), 男, 山东淄博人, 博士研究生, 主要研究方向为计算机辅助工业设计、虚拟现实等。

着差异性。消费者的感性需求产生于消费者对产品感觉、感受、知觉到产生动机的一系列心理活动,具有模糊性、动态性、复杂性和可诱导性的特征。

1) 模糊性

消费者感性需求的产生是一个多维度的心理过程,它表达的是消费者对产品的期望或要求,会以言语(包括肢体言语)和行为表达出来,在语义上具有模糊性和不确定性,且随着设计过程的推进不断细化和明确。例如消费者对手机的描述是外观大气、时尚科技、人性化,这样的需求描述是模糊的,且需求之间的关系无法准确描述,难以直接为设计师所用。

2) 动态性

随着时间的推移,消费者对某一产品的感性需求并非一成不变,而是呈动态性发展。根据马斯洛的需要层次理论,消费者的感性需求属于对高层次需要的期望,包括认知的需要、审美的需要和自我实现的需要,希望透过产品造型获得心理的满足感与愉悦感。不同时期,随着社会的发展、技术的进步和消费者自身学习能力带来的认知信息的丰富,消费者的感性需求也随之而调整 and 变化。

3) 复杂性

消费者的感性需求一般以言语的方式表达出来,自然语言是其表达的主要形式,也是与设计师交流的主要方式。自然语言的表达方式主要是感性形容词,如大气的、美观的、科技的等。消费者感性需求的产生是一个复杂的心理过程,决定了感性需求的表达会从多个角度进行展现。不同消费者因使用习惯和偏好的差异,会有不同的感性需求。此外,同一消费者对同一产品也会提出多样的感性需求,如对同一款汽车的感性需求有现代感、流畅感、动感等。

4) 可诱导性

消费者的感性需求会受到外界因素的影响而发生变化,如时尚潮流、广告宣传、现有产品的刺激、亲友的劝说等,都会诱导消费者产生一定的感性需求结构,无需求转变为有需求、弱需求转换为强需求、潜在需求转变为现实需求等。这种可诱导性与消费者的认知心理特点有密切关系,通过合理的外界刺激和内在分析,有助于诱导并挖掘出消费者的感性需求。

2 基于 DSM 的消费者感性需求聚类

2.1 DSM 模型概述

DSM 是美国 Steward^[8]博士开发出的对产品开发过程进行规划和分析的矩阵工具。DSM 最初由有向图发展而来,一个 DSM 由排列顺序相同的行列元素组成一个方阵。在 DSM 模型中,行列元素表示产品开发过程中的活动,矩阵的非对角线单元格表示行列元素之间的联系,对角线下方的单元格表示元素间具有正向联系,对角线上方的单元格表示元素间具有反向联系,对角线元素无意义,单元格中数值以二值的形式标示(如“0”和“1”“×”和“空白”等)。20 世纪 90 年代中后期,Ep-pinger 和 Smith 等人^[9,10]以此为基础发展了数字化 DSM(numeric design structure matrix, NDSM),以定量描述行列元素间关系的强弱。以六种感性需求为例,其 DSM 示意如图 1 所示。

图 1 中所示数值为以四点标度法标示的行列元素间联系的权重。其中,权重大于或等于 2 表示行列元素间有强联系;权重大于 0 小于 2 表示行列元素间有弱联系;权重等于 0 (空

白单元格)表示行列元素间无联系。表 1 为四点标度法的四种联系类型权重及其含义。

	CR ₁	CR ₂	CR ₃	CR ₄	CR ₅	CR ₆
CR ₁		2				
CR ₂	2					
CR ₃				3	1	
CR ₄			3			1
CR ₅			2	3		1
CR ₆				1	3	

图 1 DSM 示意图

表 1 四点标度法的权重及其含义

标度	权重	含义
高	3	联系强度高
中	2	联系强度中等
低	1	联系强度弱
无	0	无联系

基于 DSM 的聚类方法是在 DSM 模型中按照行列变换的方式,经多个步骤的位置对调完成^[11]。对于感性需求集 $CR = \{CR_1, CR_2, \dots, CR_m\}$, 设 CR_{ij} 为 DSM 模型第 i 行第 j 列中单元格的数值, M 和 M' 分别为 m 维行向量和 m 维列向量($i, j = 1, 2, \dots, m$), 则行元素与列元素的对调过程如下:

a) DSM 中行元素对调

$$M = (CR_{i1}, CR_{i2}, \dots, CR_{im})^T$$

$$(CR_{i1}, CR_{i2}, \dots, CR_{im})^T = (CR_{j1}, CR_{j2}, \dots, CR_{jm})^T$$

$$(CR_{j1}, CR_{j2}, \dots, CR_{jm})^T = M$$

b) DSM 中列元素对调

$$M' = (CR_{1i}, CR_{2i}, \dots, CR_{mi})^T$$

$$(CR_{1i}, CR_{2i}, \dots, CR_{mi})^T = (CR_{1j}, CR_{2j}, \dots, CR_{mj})^T$$

$$(CR_{1j}, CR_{2j}, \dots, CR_{mj})^T = M'$$

DSM 模型聚类步骤^[12]如下:

- 找出与其他任何行列元素都没有任何关系的独立元素,将其置于行列元素排列的前面,这部分元素无须聚类。
- 找出与其他大部分行列元素都有联系的元素,这部分元素称为 Bus 类元素,也无须聚类。
- 对除了 a)b)之外的其他行列元素,从任一元素出发,找出与其有强联系的元素,然后再找出与这些元素有强联系的元素,直到找到所有与该集合有强联系的元素为止,该集合成为一个聚类。然后以剩下的任一元素为起点,重复上述过程,直到对所有元素聚类完为止。
- 添加弱联系至聚类划分中。

2.2 感性需求聚类步骤

a) 目标产品样本收集。广泛搜集目标产品图片,去除相似度较高的样本,制作成调查样本。

b) 感性词汇收集。从网络、杂志、报刊、产品手册、论文等中搜集描述目标产品的形容词,结合经验设计师和消费者访谈,确定初步的感性词汇。去除明显不合适的感性词汇,同时对意义相反的感性词汇配对,其他感性词汇寻找合适的反义词,形成感性形容词对。

c) 消费者调研。按照 Likert 七级量表制作调查问卷,调查消费者对每个感性词汇相对于目标产品样本的偏好程度。

d) 感性需求筛选。对调研数据进行相关性分析,剔除与消费者喜欢感性不相关的感性词汇,合并完全相关的感性词汇^[13]。筛选后得到的感性词汇集合为 $CR = \{CR_1, CR_2, \dots, CR_m\}$ 。

e) 感性需求 DSM 模型构建。由经验工业设计师按照表 1 所示四点标度法对筛选后的感性需求打分,取均值得到感性需求的 DSM 模型。

f) 感性需求聚类计算。按照行列元素变化法对感性需求 DSM 模型进行聚类计算,得到聚类后的感性需求集合。

g)主要需求提取。根据调研数据分析,用主成分分析法提取各个聚类需求中影响因子最大的需求,从而为设计师提供较为准确的设计依据。

3 感性需求 DSM 聚类的 GA 实现

3.1 感性需求编码及种群初始化

设经调研、统计分析并初步筛选后的感性需求集合为 $CR = \{CR_1, CR_2, \dots, CR_m\}$, 由工业设计专家对感性需求形容词之间的关系按照表1赋值, 得到感性需求的 DSM 模型, CR_{ij} 为 DSM 模型第 i 行第 j 列中单元格的数值。设最大聚类数为 k , 则二维编码矩阵为

$$CL = \begin{matrix} & CR_1 & CR_2 & \dots & CR_m \\ \begin{matrix} CL_1 \\ CL_2 \\ \vdots \\ CL_k \end{matrix} & \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1m} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{k1} & c_{k2} & \dots & c_{km} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

其中:编码矩阵的每一行对应一个聚类;每一列对应一个元素,元素的顺序与 DSM 模型中的顺序保持一致。 c_{ij} ($i=1,2,\dots,k$; $j=1,2,\dots,m$) 的值代表元素 CR_j 是否在类 CL_i 中,且

$$c_{ij} = \begin{cases} 1 & CR_j \in CL_i \\ 0 & CR_j \notin CL_i \end{cases} \quad (2)$$

种群初始化步骤如下:

a) 对于一条染色体 CL , 对其每一个列向量中任取一个行元素, 置其为 1, 其余值为 0;

b) 反复执行步骤 a), 直至获得足够的初始染色体。

3.2 构建适应度函数

根据文献[14]提出的适应度函数的选择规则, 在构建 DSM 聚类适应度函数时应遵循以下前提: a) 聚类内部元素之间联系尽可能大, 聚类之间联系尽可能小; b) 较小聚类中的联系比较大聚类中的联系更加容易; c) 随着聚类数量的增加, 管理聚类的难度逐渐增加。

对于感性需求的 DSM 模型, 需求总数量为 m , 在任意一代种群中, 第 h 个染色体聚类数目为 k , 则第 i 个聚类中第 j 个基因, 相对于其他不为 0 的基因对应的权重可用式(3)计算。

$$w_{ij} = (c_{ij} \times c_{ig}) \times \sum_{g=1}^m CR_{jg} \quad (3)$$

其中: c_{ij} 、 c_{ig} 分别为该染色体中第 i 个聚类中第 j 、 g 个基因对应的权重; CR_{jg} 为该染色体第 i 个聚类中第 j 个基因对应的元素与第 g 个基因对应的元素在 DSM 中的联系权重。

如果第 i 个聚类中有 m_i 个元素 (值为 1), 那么该聚类的值 CL_i 为

$$CL_i = \frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{m_i} w_{ij} \quad (4)$$

如果该染色体实际聚类数为 k , 那么该染色体的整体聚类值为

$$CL(h) = \sum_{i=1}^k CL_i \quad (5)$$

把聚类划分的染色体整体聚类值作为目标函数, 根据相对系数确定适应度函数的方法, 该染色体的适应度函数为

$$f(h) = \frac{CL(h) - CL_{\min}}{CL_{\max} - CL_{\min}} \quad (6)$$

其中: $CL_{\min}$ 为种群中目标函数的最小值, $CL_{\max}$ 为目标函数的最大值。

种群的选择概率按照轮盘赌的方法计算, 则第 h 个染色体被选择的概率为

$$p(h) = \frac{f(h)}{\sum_{x=1}^y f(x)} \quad (7)$$

其中: $f(x)$ 为种群中第 x 条染色体的适应度值, y 为染色体总数。

3.3 交叉与变异

交叉方法: 采用单点交叉, 在父染色体矩阵列中任意选择一列作为交叉点, 交换交叉点右侧的列元素。

变异方法: 任意选取父染色体中两列元素进行交换 (行列元素顺序不变)。

4 实例验证

以某型电动滑板车的消费者感性需求分析为例, 经与厂家沟通, 确定电动滑板车的目标消费人群为 6~16 周岁的青少年。为了充分挖掘消费者的隐性需求, 从网站、书刊、杂志、论文等中搜集描述电动滑板车的形容词, 结合消费者调查和访谈, 经初步冗余度处理后, 得到共 55 个感性词汇 (略), 将意义相反的形容词配对, 同时赋予其他感性词汇以合适的反义形容词, 对感性形容词对构建 Likert 七级量表, 调查消费者对电动滑板车产品样本的感性形容词的偏好程度。

对调查得到的结果, 按照感性词汇相关性分析法^[13]予以筛选和剔除, 得到 49 个感性词汇, 如表 2 所示。

表 2 感性需求词汇

感性需求词汇集				
简洁的	现代的	出众的	精致的	阳刚的
创新的	自由的	速度的	活泼的	饱满的
精心的	未来的	另类的	实用的	突兀的
整体的	圆润的	明亮的	坚硬的	光滑的
鲜艳的	有机的	流畅的	活力的	威武的
精密的	品质的	利落的	大方的	美观的
协调的	和谐的	鲜明的	运动的	醒目的
仿生的	前卫的	多变的	动感的	科技的
可爱的	圆滑的	绚丽的	厚重的	抽象的
霸气的	卡通的	敏捷的	张力的	

根据式(1)~(7), 对消费者感性需求进行聚类。在感性需求列表中, 共包括 49 个元素, 其中“实用的”反映的是使用时的需求, 将其作为独立元素分离出来。构建 DSM 模型, 由 3 名经验工业设计师以表 1 对各感性需求进行关联性分析, 并对各单元格求均值, 得到数字化 DSM 如图 2 所示 (对角线元素以“0”表示)。

该 DSM 模型元素总数为 48, 设定最大聚类数为 6, 则染色体编码为 6×48 矩阵。种群大小设定为 96, 按照 3.1 节提出的方法对种群初始化。设交叉概率为 0.8, 变异概率为 0.2, 终止代数数为 200 代, 在 MATLAB 中执行选择、交叉和变异算子。运算在执行到 126 代时收敛, 收敛过程曲线如图 3 所示, 收敛最优目标函数值为 81.813 2。所得到的最优染色体如图 4 所示。将染色体解码至 DSM 模型中, 并将独立元素添加到行列元素最前端, 则得到聚类后的 DSM 模型如图 5 所示。从图 5 中可以看到, 联系强度较弱的元素已从聚类中分离出来, 聚类之间的联系大大减小, 聚类内部联系得到了增强, 从而有助于设计师分模块对消费者的感性需求进行研究。然后依据主成分分析法对各个聚类模块的需求进行主成分分析, 抽取贡献度最大的感性需求, 具体见文献[15], 此处不再赘述, 从而得到各聚

Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13	Q14	Q15	Q16	Q17	Q18	Q19	Q20	Q21	Q22	Q23	Q24	Q25	Q26	Q27	Q28	Q29	Q30	Q31	Q32	Q33	Q34	Q35	Q36	Q37	Q38	Q39	Q40	Q41	Q42	Q43	Q44	Q45	Q46	Q47	Q48	Q49	Q50	Q51	Q52	Q53	Q54	Q55	Q56	Q57	Q58	Q59	Q60	Q61	Q62	Q63	Q64	Q65	Q66	Q67	Q68	Q69	Q70	Q71	Q72	Q73	Q74	Q75	Q76	Q77	Q78	Q79	Q80	Q81	Q82	Q83	Q84	Q85	Q86	Q87	Q88	Q89	Q90	Q91	Q92	Q93	Q94	Q95	Q96	Q97	Q98	Q99	Q100	Q101	Q102	Q103	Q104	Q105	Q106	Q107	Q108	Q109	Q110	Q111	Q112	Q113	Q114	Q115	Q116	Q117	Q118	Q119	Q120	Q121	Q122	Q123	Q124	Q125	Q126	Q127	Q128	Q129	Q130	Q131	Q132	Q133	Q134	Q135	Q136	Q137	Q138	Q139	Q140	Q141	Q142	Q143	Q144	Q145	Q146	Q147	Q148	Q149	Q150	Q151	Q152	Q153	Q154	Q155	Q156	Q157	Q158	Q159	Q160	Q161	Q162	Q163	Q164	Q165	Q166	Q167	Q168	Q169	Q170	Q171	Q172	Q173	Q174	Q175	Q176	Q177	Q178	Q179	Q180	Q181	Q182	Q183	Q184	Q185	Q186	Q187	Q188	Q189	Q190	Q191	Q192	Q193	Q194	Q195	Q196	Q197	Q198	Q199	Q200	Q201	Q202	Q203	Q204	Q205	Q206	Q207	Q208	Q209	Q210	Q211	Q212	Q213	Q214	Q215	Q216	Q217	Q218	Q219	Q220	Q221	Q222	Q223	Q224	Q225	Q226	Q227	Q228	Q229	Q230	Q231	Q232	Q233	Q234	Q235	Q236	Q237	Q238	Q239	Q240	Q241	Q242	Q243	Q244	Q245	Q246	Q247	Q248	Q249	Q250	Q251	Q252	Q253	Q254	Q255	Q256	Q257	Q258	Q259	Q260	Q261	Q262	Q263	Q264	Q265	Q266	Q267	Q268	Q269	Q270	Q271	Q272	Q273	Q274	Q275	Q276	Q277	Q278	Q279	Q280	Q281	Q282	Q283	Q284	Q285	Q286	Q287	Q288	Q289	Q290	Q291	Q292	Q293	Q294	Q295	Q296	Q297	Q298	Q299	Q300	Q301	Q302	Q303	Q304	Q305	Q306	Q307	Q308	Q309	Q310	Q311	Q312	Q313	Q314	Q315	Q316	Q317	Q318	Q319	Q320	Q321	Q322	Q323	Q324	Q325	Q326	Q327	Q328	Q329	Q330	Q331	Q332	Q333	Q334	Q335	Q336	Q337	Q338	Q339	Q340	Q341	Q342	Q343	Q344	Q345	Q346	Q347	Q348	Q349
----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Figure 1 is a line graph showing fitness versus generation for the 2D problem. The x-axis is labeled 'generation' and ranges from 0 to 200. The y-axis is labeled 'fitness' and ranges from 35 to 85. Two data series are plotted: 'mean fitness' (represented by open circles) and 'max fitness' (represented by filled circles). Both series show a rapid increase in fitness from generation 0 to about 80, then plateau. The max fitness reaches a plateau around 82, while the mean fitness plateaus around 78.

[illegible]

- [7] HUANG Yue-xiang, CHEN C H, KHOO L P. Kansei clustering for emotional design using a combined design structure matrix [J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2012, 42(5): 416-427.
- [8] STEWARD D V. Systems analysis and management: structure, strategy and design [M]. New York: Petrocelli, 1981.
- [9] EPPINGER S D. Model based approaches to managing concurrent engineering [J]. *Journal of Engineering Design*, 1991, 2(4): 283-290.
- [10] SMITH R P, EPPINGER S D. A predictive model of sequential iteration in engineering design [J]. *Management Science*, 1997, 43(8): 1104-1120.
- [11] 唐敦兵, 钱晓明, 刘建刚. 基于设计结构矩阵 DSM 的产品设计与开发[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [12] 刘建刚, 马安, 王宁生. 基于设计结构矩阵的产品结构模块聚类方法[J]. *华南理工大学学报: 自然科学版*, 2006, 34(11): 45-48.
- [13] 苏建宁, 李鹤歧, 李奋强. 产品设计中的感性意象定位研究[J]. *兰州理工大学学报*, 2004, 30(2): 40-43.
- [14] 刘建刚, 王宁生, 叶明. 基于遗传算法与 DSM 的产品结构分解聚类方法[J]. *南京航空航天大学学报*, 2006, 38(4): 454-458.
- [15] 陈黎, 朱如鹏, 周海海. 新技术商品化中产品造型感性需求挖掘方法研究[J]. *中国机械工程*, 2010, 21(23): 2803-2807, 2808.