

【精品栏目——产品感性意象设计】

面向产品感性意象的造型优化设计研究现状及趋势

林丽^{1,2}, 郭主恩¹, 阳明庆²

(1.贵州大学 现代制造技术教育部重点实验室, 贵阳 550025; 2.贵州大学 机械工程学院, 贵阳 550025)

摘要: 目的 产品的设计优化创新一直是研究的重点, 而造型是设计优化的重要关注点之一。针对感性产品的造型优化, 充分应用感性工学理论及技术, 进行以用户为中心的意象造型优化设计成为当前的研究热点, 基于此, 对面向产品意象的造型优化设计的研究现状及趋势进行了分析。方法 通过对国内外学者相关文献的梳理和归纳, 在感性工学理论体系相关概念阐述的基础上, 分别探讨了面向产品意象造型优化设计中的意象提取、映射构建及造型创新三个主要环节; 重点分析了在产品意象造型优化中, 基于计算机算法的造型优化、基于创新理论的造型优化和基于数理统计模型的造型优化三个方面的关键理论、技术及其运用。结论 总结出了在造型优化方面中关键理论、技术的优缺点; 结合设计研究的发展趋势, 对产品意象造型优化设计提出了展望, 即多方法融合、生理心理认知测量技术结合、基于 AI 技术和大数据的优化。

关键词: 感性工学; 产品设计; 造型优化; 意象

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)02-0065-15

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.02.010

Current Research Situation and Trend of Product Image-based Modeling Optimization

LIN Li^{1,2}, GUO Zhu-en¹, YANG Ming-qing²

(1.Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2.School of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

ABSTRACT: Product design optimization and innovation have always been the focus of research, and modeling is one of the main focuses of design optimization. In view of the shape optimization of perceptual products, it has become a research hotspot to make full use of the theory and technology of Kansei engineering to carry out user centered image shape optimization design. Based on this, the research status and trend of image-oriented shape optimization design of products were analyzed. Based on the analysis of the related literature of scholars at home and abroad, and the related concepts of Kansei engineering theory system, this paper discussed the three main links of image extraction, mapping construction and modeling innovation in product image-oriented modeling optimization design, and focused on the analysis of key theories, technologies and application of model optimization based on computer algorithm, innovation theory and mathematical statistical model. This paper summarizes the advantages and disadvantages of the key theories and technologies in the aspect of modeling optimization, and puts forward the prospect of product image modeling optimization design, namely, multi-method fusion, combination of physiological and psychological cognitive measurement technology, and optimization based on AI technology and big data, combining with the development trend of design research.

KEY WORDS: Kansei engineering; product design; modeling optimization; image

产品的创新是设计师设计产品的主要目的, 而产品的造型是最能直接表达设计师设计思想与实现产

品目的和功能的重要表现形式^[1], 在现今的产品消费市场中, 产品造型的创新设计已成为影响消费者购买

收稿日期: 2019-10-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51465007, 51865003); 黔科合平台人才[2018]5781]

作者简介: 林丽(1973—), 女, 四川人, 博士, 贵州大学教授, 主要研究方向为产品设计、感性工学、传统文化创意设计。

通信作者: 郭主恩(1996—), 男, 山东人, 贵州大学硕士生, 主攻工业设计、感性工学、文化及感性创意设计。

与关注的重要因素^[2]。随着消费水平的发展,产品的更迭换代速度逐步加快,产品的形态也随着产品的创新变得越发新颖。对于同一领域的常见消费级产品来说,其功能及技术水平的差异性较小,而与之相对的产品形态差异却较为明显,为此,产品的造型已成为影响产品综合价值的关键因素之一^[3]。对产品造型的优化越来越成为产品设计开发的中心及重心,也逐渐成为影响消费者购买的重要因素^[4]。在以消费者为中心的感性时代,针对产品感性意象进行优化是产品创新的主要方式。目前,面向产品感性意象进行造型创新设计研究的主要理论技术为日本学者提出的感性工学^[5]。基于此理论及技术,学者们进行了大量的产品感性意象造型设计优化研究。首先面向产品感性意象感性造型优化设计的研究现状进行了研究;其次重点对产品感性意象造型优化设计中,基于计算机算法的造型优化、基于创新理论的造型优化及基于数学统计模型的造型优化三个方面关键理论、技术进行了较为全面的文献梳理和归纳;最后结合社会发展趋势,对未来产品感性意象造型优化设计进行了展望。

1 产品感性意象造型优化设计流程

感性工学理论(Kansei Engineering, KE)最初来源于日本,由广岛大学学者长町三生与马自达汽车集团前会长山本健一于1970年提出,是一种将用户对产品的感性因素量化为理性因素,并应用于产品设计中的理论及技术。感性工学中的英语词汇 Kansei 源于日语中的“かんせい”一词,表达了用户在内隐性认知中对产品的情感需求^[5-6]。感性意象作为非量化的形容词汇,不同个体对感性意象的评价会因所处环境、知识水平、心理因素等发生变化,但作为人类基本内隐性认知过程的外在表征,可通过此技术,对其进行量化分析,从而辅助设计师设计出更能满足用户感性需求的产品。因此,通过感性工学,研究者将用户对产品的感性诉求应用在产品造型优化设计中,以此设计出符合人们感性需求的产品方案。也就是说,感性工学的本质就是将非理性的感性加以量化表达,并应用于设计的一种技术。在产品感性意象造型优化设计研究中,目前主要通过获取感性评价(意象提取)、建立意象与设计特征的映射关系(映射构建)、基于映射关系的创新设计(造型创新)三个过程实现。

1.1 意象提取

通过感性工学,设计师可获取消费者对产品感性认知的客观数据,从而全面地了解消费者的喜好和感知,从而设计出满足消费者需求的产品,因此,意象的合理提取对有效地设计出满足消费者需求的产品具有重要意义^[7]。在产品造型优化设计过程中,运用感性工学技术,提取消费者对产品的感性意象是获得消费者需求,并指导产品优化的重要的一步。意象的

提取不仅可以获取产品所表达出的意象语意,而且能反映出消费者对产品的喜好,为产品的造型优化设计提供需求来源和意象设计方向。在产品造型优化设计中,主要是针对产品的外部设计特征引发的感性信息进行意象提取分析,意象提取的流程主要从收集目标样本,收集意象语意集,匹配样本与意象及获取感性意象四个方面进行,意象提取流程见图1。

在现有意象提取方法的研究中,Chang等人^[8]从相关专业出版物、杂志、研究论文中选取了适合于描述产品意象的形容词,并整理为情感知觉词汇表,再结合方向盘样本的设计特点,应用德尔菲法、聚类分析等方法提取了方向盘的感性意象。苏建宁等人^[9]在意象提取过程中,通过收集目标样本与意象语意集,结合问卷调查,运用统计分析、因子分析、聚类分析等统计方法进行预处理,对样本与意象词汇进行匹配关联,挖掘出用户对自行车车架感性意象。Chen等人^[10]为了客观有效地获得符合消费者偏好的苗族银质耳饰的感性意象,从眼—脑的认知数据中挖掘出用户对于苗族银质耳饰样本的意象偏好,并以意象形容词作为感性偏好的表征进行测量和判定。Quan等人^[11]针对产品感性评估,提出了基于GRA-TOPSIS的样本与意象匹配与获取的方法,将层次分析法、信息熵、博弈论和灰色关联分析结合起来,以电钻为例,获取了与产品的客观评价高度匹配的用户主观意象。Wonjoon等人^[12]为了更好地获得样本的感性意象,从在线评论中获取了意象语意词汇,并通过文本挖掘技术和自组织映射(SOM)技术进行样本匹配,实现了高效的获取感性意象过程。Liao等人^[13]开发了一种在线工具,用户通过在线工具对产品进行意象描述比较,探索用户对产品形式和可见特征的偏好,以此将产品与意象进行匹配,提取出产品的感性意象。

1.2 映射构建

随着感性工学理论在不断完善过程中,逐渐被划分为I类感性工学、II类感性工学、III类感性工学^[14]。在I类感性工学中设计师的主观因素对产品造型优化的影响比较大,为了避免主观因素影响,近年来,国内外学者主要集中于对II类感性工学和III类感性工学的造型优化设计研究。其中II类感性工学是一种计算机辅助感性工学系统(Kansei Engineering System, KES),通过KES将消费者的意象需求传递到设计内容中,并尽量寻找出可以操作的方法和手段,为产品设计提供参考。III类感性工学是通过数学模型构建的感性工学系统,它将人们的情感感知量化后,建立情感的感知量(意象)与刺激情感知觉的物理量(形式)



图1 意象提取流程

Fig.1 Process of image extraction

之间的映射关系。换言之，通过Ⅲ类感性工学可将消费者的需求和感知转换成产品设计特征，其中，设计特征与感性意象之间的映射关系的建立成为研究的重要关注点^[15]。

产品造型优化常以设计特征为对象，将样本的意象信息加以量化，通过建立意象与产品设计特征的映射关系，指导设计师设计新的优化方案。在设计特征与感性意象之间的映射关系建立过程中，主要分为单目标意象与设计特征之间的映射关系建立，以及多目标意象与设计特征之间的映射关系建立两种方式^[16]。熊艳等人^[17]提出了基于形态特征线的意象量化的产品形态设计方法，用以建立单目标意象与设计特征之间的映射关系，以此进行手机造型的优化设计。朱炜等人^[18]通过提取 SUV 汽车的品牌意象语意，以汽车的侧面和前脸的轮廓为对象，建立意象语意与设计特征之间的映射模型，最终以“硬朗—圆润”为目标意象，结合数量化一类理论，实现单目标意象的造型优化。苏建宁等人^[19]提出依据应用熵理论，将多目标意象与产品的设计特征结合起来，建立映射关系模型，并以水瓶造型为例进行优化设计，为多目标意象产品造型优化提供了思路。李愚等人^[20]以一百四十六款车型为设计特征，与二十个意象需求建立了基于基因网络的映射模型，指导了多目标意象下的汽车外形优化设计，最终通过对比研究论证了该多目标意象映射模型的准确性。

1.3 造型创新

在传统设计中，产品造型设计主要依靠设计师的主观判断，利用创造性思维，对设计方案进行评价、总结、改进和优化，并根据设计师自身的经验进行设计。在传统方式的产品设计造型优化中，设计师占主导地位，而这易导致产品造型优化结果与用户真实需求相差甚远的问题。如今，通过感性工学技术可建立完整的“感性意象—造型参数”及“造型参数—感性意象”系统，将用户的感性思维作为设计输入，协助设计师掌握产品的感性意象，并以此进行造型的优化创新，使设计的产品更能符合用户需求。

设计师和有关专家学者已经将感性工学广泛地应用于汽车、建筑机械、家用电器、服装、化妆品、布局、界面等领域^[21]。基于映射关系将意象需求转化为造型创新的要素，结合群智能算法、遗传算法、神经网络等优化算法，TRIZ 理论、QFD 理论、形状文法等创新理论，以及数量化一类理论、支持向量机、偏最小二乘法等数理模型，实现产品的造型优化研究，指导设计师实现产品感性意象造型设计的优化。

2 基于计算机算法的造型优化

2.1 群智能算法

基于自然界中群体所表现出来的群体智能性与

规律性，学者们提出了群智能算法，“群体智能”这个概念最早是由 Beni Gerardo 和 Wang Jing 于 1990 年第一次提出的^[22]。群智能算法是以具有组织行为能力的生物群体为原型，提取该生物原型的个体与个体、个体与群体及个体与环境的相互作用的行为，根据其群体表现出的强大生命力，所提出的一种算法形式。国内外学着对群智能优化算法在产品感性意象造型优化设计中的运用非常广泛，群智能算法可以很好地降低单因素对整个优化过程的影响，具有很强的鲁棒性，其主要运用的算法有蚁群算法、粒子群算法等。

2.1.1 蚁群算法

意大利学者 Dorigo^[23]于 1991 年最先提出蚁群算法，蚁群算法是依据蚂蚁的觅食过程优化的元启发式算法。其基本思想为：基于蚂蚁觅食行为，当其找到食物来源，对食物进行评估，再根据评估量留下的信息素作为路径痕迹，引导其他蚂蚁寻找食物源^[24]。根据蚁群这一行为，通过信息素路径的间接通信使蚁群可以找到巢穴与食物源的最短路径，并由此转化为优化问题。蚁群算法运用的领域非常广泛，不仅可以运用于路径规划问题^[25]，而且可以运用到系统优化^[26]等领域。利用真实蚁群的这一特性，解决产品造型优化过程中的问题，将路径作为优化的所有可行解，最短路径作为最优解，随着信息素量的增加，即逐渐满足用户的意象需求，通过此算法得到最优的产品解决方案。

在产品意象造型优化设计中，苏建宁等人^[27]以电热水壶作为案例，将提取出的消费者对电热水壶的需求意象与样本设计特征结合，通过计算权重系数得到适应度，应用蚁群算法对设计特征进行适应度计算优化，获得了基于消费者需求的优化产品，提高了设计师对产品的优化设计效率。范文等人^[28]以载人潜水器主控制台的布局为例，以人机特性及意象需求为约束条件，结合蚁群算法，实现了满足人体舒适感等需求意象的布局，解决了多约束条件下的优化设计。杨洁等人^[29]为了更好地依据用户的意象需求指导产品的外形设计，提出了基于蚁群算法的一种关联模型，将用户的感性认知与产品形态特征进行结合，利用蚁群算法建立意象与产品外形的映射关系模型，获取意象与设计特征的相近性矩阵，以此进行产品的优化设计。

2.1.2 粒子群算法

粒子群算法（PSO）最初是由美国学者 Poli 和 Kennedy^[30]于 1995 年，基于鸟群觅食过程提出的全局式寻优算法。粒子群算法的基本思想为：在鸟群觅食过程中，虽然鸟群和食物的相对距离是已知的，但是具体的位置是未知的，因此最简洁的方式就是寻找离食物最近的鸟所处的范围，从而获得快速找到食物的解。粒子群已广泛应用于工程优化的各方面^[31]，在产品感性意象造型优化设计也得到了大量的应用。

基于粒子群算法的思想,将鸟群中的个体看为产品的造型方案的所有解,以意象需求作为适应值,以此进行优化求解,得到优化后的产品造型方案。

Moon 等人^[32]运用粒子群算法,并结合客户意象需求、客户满意度等因素,对通用航空飞机系列的产品族进行了多目标的优化设计,该优化算法可为产品族设计的多目标优化提供一个合理的解决方案。王亚辉等人^[33]运用粒子群算法对汽车造型进行多目标优化设计,以意象、情境与人机工程等决定因素进行空间描述,作为模型建立优化过程的适应值,运用粒子群算法求解,可有效地减少设计师的主观想法和不同个体之间的决策差异,得到的汽车造型优化方案可更加真实地反映出用户的意象需求。Jiang 等人^[34]基于在线客户评价提出了一种意象设计关联规则挖掘方法,在包含用户丰富的意见及期望信息的各种网站上,找到大量关于产品的在线客户评论,通过多目标粒子群算法,生成了描述情感维度和设计属性之间关系的关联规则,以汽车造型为例,极大地提高了设计师优化产品的效率。丁满等人^[35]根据消费者在色彩设计中,对色彩表达的意象决策信息的不确定性,建立了有关意象模糊决策的设计模型,结合粒子群算法对模糊模型进行优化求解,得到可以真实反映消费者需求的产品配色方案。张娜等人^[36]以摄像头造型设计方案为例,以消费者的感性意象为权重,建立评价群体的共识度模型,引入粒子群算法对评价矩阵进行优化,在此基础上遴选出设计方案,使最终的方案具有较高的适应性与可靠性。

2.2 遗传算法

遗传算法 (Genetic Algorithm, GA)^[37-38]最初是由美国学者 J.Holland 于 1975 年提出的,遗传算法是基于自然界中“适者生存,优胜劣汰”这一遗传机制提出的自适应优化算法。遗传算法已经广泛应用于现代智能计算中的机器学习^[39]、组合优化^[40]、信号处理^[41]等各个领域。目前在造型设计中对遗传算法的运用比较广泛^[42],通过设计特征和设计需求关系的选择、交叉、变异等得到最优的设计方案。遗传算法在产品领域,主要运用基于基本遗传算法、交互式遗传算法、自适应遗传算法等对设计特征实现优化组合,指导设计方案的生成。

2.2.1 基本遗传算法

基本遗传算法 (标准遗传算法) 是遗传算法中的基础算法,是其他遗传算法的原型。基本遗传算法由设定的二进制数字表示问题的可行解 (称作种群),对初始种群的可行解进行选择、交叉、变异等,以此优化初始种群,产生的新种群会继续进行遗传优化,从而得到满足约束条件优化后的种群,即为优化解。在产品优化设计中,基本遗传算法被广泛应用,使优化出的子代结果比父代结果更符合设计师或消费者

的需求。

Shieh 等人^[43]以花瓶为例,对花瓶的设计特征进行分析,得到设计基因编码,结合用户对花瓶设计特征的意象和用户的需求,提出了基于支持向量机的基本遗传算法优化模型,并通过此模型取得很好的优化效果,为其他产品的造型优化提供了一个很好的解决方案。刘弘等人^[44]运用数学的方法将产品转换为各设计特征,并对设计特征进行二进制编码,利用基本遗传算法,结合设计师和消费者评价,获得产品的意象需求,生成更具有优势的产品组合造型方案。杨延璞等人^[45]运用基本遗传算法,对产品设计特征进行编码,构造产品基因,以产品意象需求求解为适应度函数,建立基于产品意象的造型优化设计模型,对其优化求解,获得优化后的产品造型设计新方案,以板式家具为例,对其造型设计进行优化,验证了方法的可行性。胡伟峰等人^[46]以汽车造型为例对其进行设计优化,以汽车典型的设计特征为遗传编码基因,结合用户意象,提出了基于用户需求驱动的遗传算法优化模型,以基本遗传算法优化思想与方法实现了符合用户需求的汽车造型设计。

2.2.2 交互式遗传算法

随着新思路的提出,近年来,国内外学者对其他类型的遗传算法也进行了研究。1986 年学者 Richard Dawkins^[47]在基本遗传算法的基础上进行创新,提出了交互式遗传算法 (Interactive Genetic Algorithm, IEC/IGA)。交互式遗传算法将人对问题的主观评价作为约束值^[48],把人的评价与遗传计算结合起来,以解决感性量化指标难以用合适的函数值表示遗传算法中主观评价的问题^[49]。交互式遗传算法融入了人对产品的感性信息,使最终的优化结果可以更加符合个人的偏好,可以更好地应用在感性工学领域。

Yuan 等人^[50]为了获得满足用户感性要求的色彩方案,减少在产品设计时过多依赖设计师经验和其他专业知识的形式,提出了一种基于感性工学和交互式遗传算法的色彩方案设计优化方法,根据彩色图像贡献值、色彩和谐度和用户评价,建立适合度函数,以数控机床色彩设计为例,运用交互式遗传算法生成优化配色方案。Bakaev 等人^[51]将交互式遗传算法应用到 Web 界面上,对产品的潜在用户进行调研,得到用以描述产品的意象形容词,对现有产品原型进行评价,建立意象词汇与设计特征之间的映射关系,将用户的意象偏好作为适应度函数,进行交互式遗传计算,获得优化后的界面属性组合,成功地将交互式遗传算法应用到 Web 界面造型布局方面。徐江等人^[52]通过感性工学的方法,提取用户意象语义和产品设计特征,构建设计特征与意象之间的映射关系,建立适应度评价,以手机造型为例,基于交互式遗传算法优化造型设计。苏建宁等人^[53]以水瓶设计为例,通过统计分析设计师和用户的需求意象,建立产品的需求认

可度,以此作为选择机制得到适应度函数,以交互式遗传算法进行优化,获取用户和设计师认可度较高的优化产品方案。

2.2.3 自适应遗传算法

自适应遗传算法(Adaptive Genetic Algorithm, AGA)是对基本遗传算法的一种改进, M.Srinivas^[54]在 1994 年给出了自适应的交叉和变异概率,创新了基本遗传算法,它通过对遗传参数的自适应调整,增加了遗传算法的收敛精度与速度,提高了遗传算法的适应度。在产品造型优化设计中,对自适应遗传算法各个阶段(编码、选择、交叉、变异、约束条件等)的关系建立,构建形态设计属性的层次模型,可加快优化速度,提高设计效率。

宋红等人^[55]以水杯为例,为减少传统用户对产品的功能意象等评价的模糊性,通过行为层面和情感层面了解用户的意象需求,并结合交互式遗传算法和生物的免疫机制优化水杯造型,设计出符合用户需求和美学要求的水杯造型。Wang 等人^[56]结合椭圆傅立叶分析(EFA)和信息熵得到用户对产品的意象偏好,以汽车外形设计为例,运用自适应遗传算法进行优化,研究结果表明该模型可以为设计人员进行产品形式的多目标进化设计提供普适性的思路。

2.3 神经网络

人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN),在机器学习等领域已有广泛的应用^[57]。20 世纪 40 年代,人工神经网络的研究就已经开始^[58],直到 20 世纪 90 年代后,人工神经网络的研究才迅速开展起来。早期的神经网络算法主要是对大脑神经的抽象和模拟。人工神经网络可以根据外部信息改变内部权重,具有很强的自适应性。与遗传算法相比,神经网络的优化速度非常快,而遗传算法由于需要世代优化,优化速度较慢^[59]。神经网络的输入层、隐藏层和输出层的结构关系可以很好地解决产品的设计特征与产品感性意象的映射关系,以此进行优化,提高产品设计的效率。神经网络现今已被成功地应用到产品优化领域中,其中以 BP 神经网络的应用最为广泛。

BP(Back Propagation)神经网络是 Rumelhar 等学者^[60]于 1986 年基于神经网络提出的改进的形式,是应用最为广泛的一种神经网络改进算法^[61]。Back Propagation 的中文意义为“误差反向传播”,BP 神经网络就是通过误差反向传播进行训练的人工神经网络,该算法通常被认为是一种监督式学习方法^[62]。在产品造型优化方面,可以根据意象需求进行自我监督式的学习,有并行、容错的特点,为产品造型创新提供一个高效率的解决方式。

在产品意象造型优化设计中,张硕等人^[63]以壁挂式充电桩为例,对充电桩的设计特征和感性意象进行了分析,以充电桩的设计特征作为 BP 神经网络的输

入,感性评价的结果作为输出,建立起 BP 神经网络的优化数学模型,以此设计出符合用户需求的优化产品。Diego 等人^[64]以乒乓球拍和摩托车头盔为例,提出了一种基于神经网络的消费者情感反应建模方法,基于用户的感性意象评价,经过 BP 神经网络训练后,建立意象需求的模型,与产品设计特征结合后再次通过 BP 神经网络进行优化,得到符合用户意象需求的产品。Tung 等人^[65]提出了基于 BP 神经网络的图标图像设计方法,将图标图像的设计特征结合用户的情感认知,建立静态图标和用户图像感知之间的关系,以 BP 神经网络为优化算法,获得以用户为中心的移动设备界面图标图像设计方案,为界面/图标设计提供了符合用户需求的设计思路。冯青等人^[66]基于 BP 神经网络,提出一种复杂产品的配色方法,通过该方法建立能够解释并反映用户感性评价的系统,可以根据用户的情感需求进行优化,经过该方法的训练迭代,获得配色方案,最终获得优化后的配色设计方案。

2.4 模糊算法

模糊算法是基于模糊数学的智能算法的一种,最早在 1968 年由 Zadeh 提出^[67],可以解决大部分系统的非线性与不可预测性的问题。在产品造型优化中,利用模糊规则,通过模糊化和反模糊化实现模糊推理,可很好应对意象与设计特征信息不明确的情况。

通过模糊算法,可在产品造型设计中进行评价模型结构分析^[68]、模糊评判矩阵建立^[69]、权重矢量设定及排序^[70]等,以此建立优化模型,进行产品设计的创新。Wang 等人^[71]以女式高跟鞋为例,建立了基于案例推理的产品风格构建模型与模糊层次过程评价模型,以减少风格特征与感性意象之间关联属性的不确定性及非线性问题,通过该模型可实现对产品风格特征类型的优化。曾栋等人^[72]针对产品样本的感性评价问题,结合模糊算法,提出一种产品造型模糊感性评价方法,将意象评价权重值等模糊信息数值化,建立意象尺度空间,为市场产品案例优化建立科学的决策依据,以此对产品进行优化,以获取更符合用户需求的产品类型。杨超翔等人^[73]基于模糊分析,建立了老年概念产品感性评价方法,将感性评价按照属性分为功能性、外观性等概念,结合模糊算法,建立感性评价体系,指导设计师对产品的创新,最终达到优选设计的目的。

2.5 粗糙集

粗糙集(Rough Set)理论是由 Pawlak 于 1982 年提出的数学工具^[74],是一种基于规则的知识获取方法,可以分析不完备、无关联性、不准确的一些信息。粗糙集理论在机器学习、模式识别、数据挖掘和知识发现等领域被广泛应用^[75],由于粗糙集理论具有处理模糊信息和非线性关系的能力,能够针对不精确的非线性特点的感性意象评价进行处理,因此它被广泛应

用于感性工学领域^[76]。

近年来粗糙集在感性工学领域里,面向鞋子、酒瓶、汽车造型等设计项目的优化研究都取得了很好的效果^[77]。针对感性评价中个性化差异带来的各种数据不一致性,利用变精度贝叶斯粗糙集,充分考虑用户对产品的意象评价,提高了优化模型的鲁棒性,为此,胡名彩等人^[78]通过此方法从意象评价中提取影响决策部分,以此指导设计,并以烤面包机为例,证明了此方法的有效性。Shieh 等人^[79]以牙刷为例,将消费者对牙刷的整体视觉感知意象进行了综合分析,利用粗糙集理论对设计数据集的属性进行约简,将牙刷的形态和颜色相结合,为设计人员建立设计框架,进行优化设计。Zhu 等人^[80]提出了一种在主观环境下对设计概念进行评价的系统方法,通过粗糙集理论整合个人的判断和偏好,并处理决策中的模糊性,提出了一种基于粗糙数的层次分析法,以确定各评价指标的权重,能有效地提高主观环境下设计概念评价的客观性,为准确地指导设计的优化提供了新的思路。

2.6 多优化方法结合

在产品造型设计优化中,不同的优化方法有着各自的优化效果,总体而言,群智能算法具有很强的稳定性,不会因为个体影响到整个群体;遗传算法具有适应性,设计流程简单;神经网络算法优化速度快,收敛性好;以及其他优化方法均各自有各自的特性。国内外学者根据不同的适用范围和场景,在产品造型设计优化研究中,结合各方法的优点进行综合应用,指导产品造型设计。

Deng 等人^[81]通过构建一个基于交互式遗传算法和 BP 神经网络的交互进化设计系统,根据用户的意象需求,以用户对图像语义的偏好程度确定该系统的有效值,引入 BP 神经网络模拟人工评估,通过酒瓶设计实践验证了该研究的有效性。Li 等人^[82]为了提取更准确的感性认知,将粗糙集理论应用于基于规则的系统,以降低获得准确感性评价的复杂性,并将感性认知与产品设计特征相结合,基于 BP 神经网络进行优化,并应用于运动鞋的设计中,验证了组合式优化方法的有效性。

3 基于创新理论的造型优化

3.1 TRIZ 理论

TRIZ 理论即发明问题解决理论,该理论最早是由前苏联 G.S.Altshuller 等人于 1946 年提出的^[83]。根据 TRIZ 理论,在解决提出的问题,需要排除自身以外的其他影响因素,通过对问题进行理想化的解决,得到理想的方案,以确定理想方案的路径。确定好理想路径后,在真正解决问题时,沿着理想路径进行优化创新,得到与理想方案相近的解决方案,通过

此理论可有效地避免解决问题时缺乏方案路径的问题,进而提高人们创新优化的进程,得到更具创新的高质量产品^[84]。

Wang 等人^[85]为提高消费产品的创新性与竞争力,通过 TRIZ 理论,应用矛盾矩阵处理多功能替代方案之间的工程冲突,以寻求创造性解决方案,进行关联规则挖掘识别,得到客户需求意象的关键特征,通过联合分析,推导客户意象需求,进而用于各种设计概念的优化,并以手机摄像头为例,证明此方法的可行性。Hartono 等人^[86]将感性工学和 TRIZ 理论结合起来,利用感性工学的方法识别服务属性和客户满意度之间的关系,TRIZ 理论用于生成改进设计,使最终优化创新后的设计解决方案与用户需求之间的差别降到最低。张建敏等人^[87]利用 TRIZ 理论和产品创新设计理论,提出一种基于 TRIZ 理论的旋耕机创新优化设计方法,为了满足消费者对该产品的意象需求,根据用户需求和产品功能技术矛盾与功能原理,以此进行创新优化设计,设计出既能满足用户需求,又符合产品功能的产品。

3.2 QFD 理论

QFD (Quality Function Deployment) 理论是一种将顾客或者市场的需求转换成产品设计规格的方法, QFD 即质量功能配置,最初是由日本学者赤尾洋二^[88]提出。作为一项质量管理系统的多层次演绎分析方法, QFD 被广泛地应用于产品设计创新当中。在产品优化过程中,通过获取消费者的意象与市场的需求,将其量化为可以设计的产品参数,将其与加工过程和价值评价相结合,得到既符合市场需求又能高效利用企业成本的产品类型^[89]。

Wu 等人^[90]基于 QFD 理论,建立了系统的创新过程模型,并对设计决策与评价方法进行了探讨和发展,将顾客需求更全面、更深入地转化为产品设计属性,并以自行车作为案例,证明了所提出的设计过程是可行和有效的。在产品传统创新过程中,很难将用户的意象需求与产品的技术要求结合起来,技术性的限制往往会降低产品的用户需求采纳程度,为此, Dolgun 等人^[91]将 QFD 理论应用到产品创新中,将用户需求转换为可以在技术要求上实现的设计规格,以酸奶盒为例,有效地提高了用户需求在产品优化设计中的采纳程度。此外,李强等人^[92]为降低不同的消费者需求对产品销售的影响,提出了一种基于 QFD 理论的产品设计模型,建立消费者意象需求和产品设计特征之间的关联性,在质量屋中以相对标度进行参数化处理,以洗衣机的个性定制为例,验证该理论方法对产品优化的有效性。

3.3 形状文法

形状文法 (Shape Grammar, SG) 于 19 世纪 70 年代由麻省理工学院乔治·斯蒂尼提出的^[93]。该理论

的核心是按照人们的需求,以形状为原形,基于特定的形状规则,定义了一类非代表性设计的完整、规范的形式规则,依据一定的形式规则产生新形态的方法^[94]。形状文法最初是用于绘画和雕塑,现已广泛应用于工业设计领域^[95],通常被用于生成大量设计方案^[96];总结归纳已有的系列化、通用化、标准化的设计规则^[97];也可与其他方法结合对设计方案进行推演^[98]。

Chen 等人^[99]为了满足消费者对产品体验多样性的期望,以智能手表的佩戴特点为例,建立了基于感性工学和形状文法的设计模型,对感性需求结果数据进行定性分析,分析了情感语义与设计特征的相关性,并将形状文法应用于形状设计特征的演绎,以智能手表的定制和多样化设计为例,在满足设计规范的同时起到了很好的优化效果。Shen 等人^[100]为进一步研究用户对风格图像的感知与产品形状特征的关系,建立了一种基于形状文法的产品特征图像设计模型,以形状文法为基础,对高脚杯造型曲线进行优化分析,研究结果表明,该方法有助于设计师更好地把握产品风格,为产品的优化创新设计开发起着关键的作用。

4 基于数理统计模型的造型优化

4.1 数量化一类理论

数量化一类理论是专门处理定量与定性数据的一种多元线性回归方法,最早在 20 世纪 50 年代由日本学者林知巳夫开始研究^[101],现已广泛地应用到感性工学领域。通过数量化一类理论将各设计特征(自变量)与意象值(因变量)建立关系,基于多元线性回归建立数理统计模型,得到自变量即设计特征的意象偏重,以此进行设计的优化创新,获取满足意象需求的产品。

国内学者苏建宁等人^[102]将数量化一类理论应用到感性工学中,以手机造型为例,得到了各设计特征和感性意象之间的偏相关系数,用以反映设计特征对意象的贡献度。在对产品进行优化时,可以根据意象需求确定相应的设计特征,最终得到满足用户意象的设计方案。李辉等人^[103]以卷烟包装为例、刘征宏等人^[104]以数控机床为例、杨程等人^[105]以手机为例、周蕾等人^[106]以信息界面为例,基于数量化一类理论建立数学模型,均得到了较好的优化效果。

4.2 支持向量机

在机器学习中,支持向量机(Support Vector Machine, SVM)是在分类与回归分析中,分析数据的监督式学习数理统计模型算法,原始 SVM 是由 Vapnik 于 1964 年提出的^[107]。意象评价作为非线性问题,通过 SVM 可以有效地对其进行非线性分类,将其输入隐式映射到高维特征空间中,建立支持向量

机的意象评价模型,在对模型进行验证性评估的基础上,以此指导产品造型的优化创新。

柴春雷等人^[108]为更好地建立意象需求与设计特征之间的映射关系,准确把握用户情感需求,利用支持向量机,构建产品意象语意识别回归数学模型,以电热水壶为例,验证了该模型在多维评价中可以取得更好的优化效果的结论。李文华等人^[109]在主观评价过程中加入眼动参数数据,并结合意象需求建立支持向量机回归模型,以航空座椅为例进行优化设计,结果表明,此模型可以更好地提高设计效率、准确率,为造型优化提供了一种更为高效的方法。

4.3 偏最小二乘法

偏最小二乘法(Partial Least Squares Method, PLS)是基于数理统计模型的一种优化方法,偏最小二乘是由瑞典统计学家 Herman Wold^[110]提出的,它通过最小化误差的平方和,找到一组数据的最佳函数匹配,这是多元线性回归、相关分析和主成分分析相结合进行优化的数学模型。在产品造型优化中,通过偏最小二乘法,可在多种相关性评价维度下进行分析建模,可在样本数量少于自变量数量的情况下建立映射关系模型。基于偏最小二乘法的优点,结合感性工学理论,在产品优化领域多有应用。

Göken 等人^[111]为了解用户对土耳其茶杯的意象需求,并以此进行产品创新,利用偏最小二乘法建立感性意象与产品特征之间的相关性,以进行更为准确的分析评价,获取了意象需求与设计特征的关系,并通过优化后的产品进行验证,为土耳其茶杯优化提供了设计思路。Shieh 等人^[112]将运动鞋的意象需求与设计特征通过主成分分析与偏最小二乘法分析,将结果进行对比,表明偏最小二乘法可以更好地建立意象与造型的映射关系模型,通过验证表明,偏最小二乘法具有很强的鲁棒性,并可以构建一个简单、快速的设计模型,提高设计效率。

5 造型优化相关理论、技术的优缺点分析

作为产品优化创新过程中的关键一部分,基于产品意象的造型优化理论,技术的运用直接决定优化的结果,但是作为产品造型优化的后期工作,前期的意象提取和定量分析对后续优化成效有很大的影响,意象提取方法不完善或者定量分析不准确,会直接影响优化结果的效度。如在遗传算法优化过程中,若造型编码基因不准确,意象提取不能获取准确的用户需求,以及约束条件的设置失误,都会直接导致优化的失败。

通过对常见的产品意象造型优化方法的分析,根据各优化理论、技术的特点及国内外学者的应用实例,归纳总结了感性工学领域内所应用的各个相关理论、技术在产品意象造型优化设计中的优缺点,产品感性意象造型优化中相关理论、技术比较见表 1。

表 1 产品感性意象造型优化中相关理论、技术比较

Tab.1 Comparison on relevant theories and technologies of product image modeling optimization

优化技术		优点	缺点
计算方法	群智能算法	无集中控制约束，不会因为个别解影响整个种群，具有较强鲁棒性；产品之间以非直接的方式交互作用；操作简单易行；具有潜在的并行性和分布式特点	参数的设定和选取困难；连续问题求解较复杂
	蚁群算法		
	粒子群算法		
	基本遗传算法	对问题的依赖性小，具有扩展性；操作简单易行，流程思路比较清晰；基于自然界适者生存，具有自组织性	对原始群体有很高的依赖性；遗传因子的选择需要有很高的明确性
	交互式遗传算法	设计师或消费者参与感性评价，可以将评价结果结合到算法中，并将解决计算机评价的不完善性；辅助理清产品意象和设计特征的关系，有利于产品创新设计；意象造型评价过程具有直观性；实现人机交互，可根据消费者喜好进行创意造型方案的进化设计	增加消费者或设计师的工作量，进化设计速度较慢；消费者或设计师对产品意象造型的分辨能力有限，易疲劳
	自适应遗传算法	搜索从群体出发，具有并行性；遗传算法依据适应度值选择，具有自适应性、自学习性；加快了收敛速度、增加了收敛精度，优化效率比较高	缺少反馈机制；对初始种群具有依赖性；局部搜索能力弱
	BP 神经网络	优化速度快，神经网络变化很短时间完成；优化效率比传统算法速度更快	学习速度慢，即使是一个简单的问题，一般也需要几百次甚至上千次的学习才能收敛；容易陷入局部极小值；网络层数、神经元个数的选择没有相应的理论指导；网络推广能力有限
创新理论	模糊算法	很好地解决意象与设计特征信息不明确的情况；利用模糊规则实现意象与造型之间关系的推理；利于解决感性评价意象权重的问题	模糊算法处理结果往往不太理想；模糊算法前期需要建立一系列模型矩阵结构，工作量比较大
	粗糙集	定量分析处理不精确、不一致、不完整的信息；减少意象与产品形态之间不同设计师之间的认知差异；可以考虑每位用户的评价指标，具有评价的完整性	对变量值要求很高，不能使用连续的评价、造型等变量值；需要进行迭代学习，学习速度慢
	多优化方法结合	结合各技术和算法的优点，提高优化方法的有效性；具有较强的全局和局部搜索能力；寻优性能更强	选择合适的混合方式比较困难；相关进化参数的设定比较困难
	TRIZ 理论	设计过程简单且易操作、经济性强；加快设计师设计的进程，而且能得到高质量的创新产品	设计师主观评价因素比较大，不利于产品的优化；需要有一个理想化的模型载体，不具有普遍性
	QFD 创新理论	能够很好地引导消费者参与设计的创造性思考，借助消费者的需求分析进行设计；快速获取消费者需求目标与手段	工作量大，需要对大量消费者进行分析；该方法周期较长，不利于快速的出优化方案
数理统计模型	形状文法	结合现今计算机技术可以快速获得大量设计方案；可以根据原有产品进行迭代，获得特征性产品	需要提前分析产品形态语意；产品优化，得出方案后需再次进行筛选
	数量化一类理论	自变量与因变量明确，参数值设置简单；数学模型易懂，适合简单的产品创新优化	优化创新受意象提取影响较大，主观性因素比较强；只能针对设计特征较为简单的产品分析优化，不具有普适性；效率较低，需要大量的数据支撑
	支持向量机	对于多维评价优化，效果明显；具有自我监督学习性，准确率较高，效率较高；适合模糊和综合感性认知的产品	模型建立比较复杂，需要建立较多的函数模型；适合产品形态提取要素较少的产品优化
	偏最小二乘法	对于样本数量较少，自变量因素较多的情况下可更好地建立模型；能够在自变量存在严重多重相关性的条件下进行回归建模；偏最小二乘回归在最终模型中将包含原有的所有自变量	只适合线性关系建模，具有一定的局限性；模型具有不可逆性，建立较为困难

6 产品感性意象造型优化设计研究展望

通过对国内外专家在产品感性意象造型优化领域的研究梳理发现,近年来,国内外学者主要集中在意象提取、定量分析方面对产品感性意象造型进行创新和深入研究。在意象提取过程中,随着计算机技术和大数据的发展,通过获取大数据中与产品高度符合的信息,可提取到用户真实的感性意象诉求。例如, Sembiring 等人^[113]对通过社交媒体获得的大量数据进行分析,获取用户及潜在的消费者对巧克力的意象需求; Jiao 等人^[114]通过自然语言处理技术,自动提取有关产品的在线评论,在大量文本数据的基础上进行筛选,获取与产品高度相关的意象需求; Wang 等人^[115]基于在线评论进行文本挖掘,获得具有情感属性的意象词汇。此外,在定量分析过程中,国内外学者逐步将关注点转移到基于生理的内隐性测量技术,以实现用户对用户更准确的、无意识的感性信息的研究,林丽等人^[116]结合眼动数据的定量化,表达用户对产品设计的评价方案,获得更准确的定量化用户评价信息; Wang^[117]从服装设计出发,以脑电数据对用户的情感需求进行定量分析;此外基于核磁共振数据^[118]、心电数据^[119]、脑电数据和眼动数据相结合^[120]等基于生理数据的定量分析也多有应用。综上所述,随着新技术、大数据及跨领域知识的深度融合,产品感性意象造型设计优化的研究热点和发展趋势将从以下几个方面展开。

6.1 多方法融合

从国内外学者最新的研究成果来看,多方法融合优化已取得了很大的进展。Li 等人融合模糊算法与多目标遗传算法进行优化^[121], ChooJun 等人将粒子群算法与遗传算法融合实现优化^[122], Lin 等人在神经网络算法中引入粒子群算法完成优化^[123], Bhattacharya 等人将粗糙集理论与粒子群算法相结合应用于优化^[124],这些融合优化方法在各自的实验案例中得到了比单个方法更好的优化结果。根据第5节的内容,不同的优化方法有各自的特性,每种方法都有适合的优化类型与内容,各优化方法也有自己的不足之处,研究中将各优化方法优缺点互补,从而提高优化产品的效率、可行性、有效性。因此,多方法融合优化依旧是当下设计优化的研究热点。

6.2 生理心理认知测量技术结合

在产品感性意象造型优化设计过程中,用户的感性意象评价是影响数据效度与结果信度的重要因素。为提高量化分析的效度和优化方案的可靠性,需要提高用户感性评价的匹配度。用户的感性评价作为内隐性认知过程,传统的语义差异法、意象尺度、口语分析法等基于心理测量方法属于外显测量方法^[125],用

户的潜意识信息无法准确触及。然而用户的行为表现主要由潜意识的内隐认知来主导^[126],最新的国内外研究表明,在意象认知过程中,潜意识可以更好地反映用户的真实情感,将生理心理认知测量技术结合,可以实现有效地对产品设计方案的意象提取和评选^[127]。由于各生理心理信号有其固定的应用范围,将各信号有机地融合进行分析、量化及评价比较困难,研究学者在用户感性研究中多停留在单个信号测量或眼动联合脑电信号测量,但若能将多模态的生理心理信号相融合,发挥各自优势,更能准确分析用户的内隐性认知。所以,随着各认知测量方式融合创新模式的开启,将生理学、心理学、认知神经科学等学科、技术及方法的融合进行认知分析将是未来研究的新的趋势。

6.3 基于 AI 技术和大数据的优化

随着深度学习、强化学习、知识图谱、AutoML 等 AI 技术在研究领域的应用突破,可更好地获取用户对产品的兴趣所在,帮助设计师更加准确地捕获用户的感性意象需求,更精准地达成感性意象诉求和有效设计特征之间的转译桥梁,有针对性地进行优化创新设计。此外,由于大数据蕴含大量有价值的用户设计信息,能够从中挖掘出全面而精准的用户感性意象需求,从而解决传统意象集的建立有偏差、意象测量需大量实验样本及意象收集繁琐等问题。为此,基于深度兴趣网络^[128]、用户兴趣演化网络^[129]、用户多兴趣轨道记忆网络^[130]等 AI 技术的提出,以及大数据信息的挖掘、计算机视觉及自然语言处理等领域的发展,充分应用 AI 技术和大数据展开产品感性意象研究将会是未来研究的重要趋势。

7 结语

通过对国内外学者在产品感性研究领域中针对造型优化设计的相关研究成果进行了梳理和总结,回顾了产品感性意象造型优化设计过程,并对基于计算机算法的造型优化、基于创新理论的造型优化和基于数理统计模型的造型优化三个方面的关键技术和理论进行了较为全面的分析和阐述,并归纳总结了它们的优缺点,进一步地对产品感性意象造型优化的发展趋势进行了展望。产品优化创新并不仅仅是产品的创新,在工业设计越发受到重视的当今,优化创新的思维、技术、方法及理念仍需投入大量精力,进行更深层次的探索和研究。

参考文献:

- [1] 苏建宁,王鹏,张书涛,等. 产品意象造型设计关键技术研究进展[J]. 机械设计, 2013, 30(1): 97-100.
SU Jian-ning, WANG Peng, ZHANG Shu-tao, et al.

- Review of Key Technologies of Product Image Styling Design[J]. *Machine Design*, 2013, 30(1): 97-100.
- [2] 罗仕鉴, 潘云鹤. 产品设计中的感性意象理论、技术与应用研究进展[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]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(3): 8-13.
- [3] 程博, 林丽, 阳明庆. 感性工学技术下的产品意象设计研究现状[J]. *贵州大学学报(自然科学版)*, 2016, 33(2): 67-70.
- CHENG Bo, LIN Li, YANG Ming-qing. Research Status and Trend of Product Image Design Based on Kansei Engineering[J]. *Journal of Guizhou University (Natural Science Edition)*, 2016, 33(2): 67-70.
- [4] 罗仕鉴, 朱上上. 用户和设计师的产品造型感知意象[J]. *机械工程学报*, 2005(10): 28-34.
- LUO Shi-jian, ZHU Shang-shang. Users' and Designers' Product Form Perceptual Image[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2005(10): 28-34.
- [5] NAGAMACHI M. Kansei Engineering: a New Ergonomic Consumer-Oriented Technology for Product Development[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 1995, 15(1): 3-11.
- [6] NAGAMACHI M. Kansei Engineering as a Powerful Consumer-Oriented Technology for Product Development[J]. *Applied Ergonomics*, 2002, 33(3): 289-294.
- [7] YANG C C. A Classification-Based Kansei Engineering System for Modeling Consumers' Affective Responses and Analyzing Product Form Features[J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(9): 11382-11393.
- [8] CHANG Y M, CHEN C W. Kansei Assessment of the Constituent Elements and the Overall Interrelations in Car Steering Wheel Design[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2016, 56: 97-105.
- [9] 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(2): 40-43.
- SU Jian-ning, LI He-qi, LI Fen-qiang. Investigation of Kansei Image Direction for Product Design[J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2004(2): 40-43.
- [10] CHEN Y, LIN L, CHEN Z A. Research on Product Preference Image Measurement Based on the Visual Neurocognitive Mechanism[C]. Singapore: Springer Singapore, 2020.
- [11] QUAN H F, LI S B, WEI H J, et al. Personalized Product Evaluation Based on GRA-TOPSIS and Kansei Engineering[J]. *Symmetry*, 2019, 11(7): 867.
- [12] WONJOON, KIM, TAEHOON, et al. Mining Affective Experience for a Kansei Design Study on a Recliner[J]. *Applied Ergonomics*, 2019, 74: 145-153.
- [13] LIAO T, KESLER T, MACDONALD E. Revealing Insights of Users' Perceptions: an Approach to Evaluate Wearable Products Based on Emotions[J]. *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design*, 2019, 1(1): 3969-3978.
- [14] 李月恩. 感性工程学[M]. 北京: 海洋出版社, 2009.
- LI Yue-en. *Kansei Engineering*[M]. Beijing: Ocean Press, 2009.
- [15] ZHANG Shu-tao, SU Jian-ning, HU Chi-bing, et al. Product Form Identification Technology Based on Cognitive Thinking[J]. *Telkomnika Indonesian Journal of Electrical Engineering*, 2013, 11(10): 5904-5910.
- [16] 李雄, 苏建宁, 陈彦嵩, 等. 产品意象造型设计应用研究进展[J]. *包装工程*, 2019, 40(8): 1-9.
- LI Xiong, SU Jian-ning, CHEN Yan-hao, et al. Review of Product Image Form Design and Its Application[J]. *Packaging Engineering*, 2019, 40(8): 1-9.
- [17] 熊艳, 李彦, 李文强, 等. 基于形态特征线意象量化的产品形态设计方法[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2011, 43(3): 233-238.
- XIONG Yan, LI Yan, LI Wen-qiang, et al. An Image Quantization of Product Form Design Method Based on Form Feature Lines[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2011, 43(3): 233-238.
- [18] 朱炜, 赵磊, 王小龙. 基于品牌意象的 SUV 造型设计方法[J]. *机械设计*, 2017, 34(1): 118-121.
- ZHU Wei, ZHAO Lei, WANG Xiao-long. SUV Modeling Design Method Based on Brand Image[J]. *Journal of Machine Design*, 2017, 34(1): 118-121.
- [19] 苏建宁, 张新新, 景楠, 等. 认知差异下的产品造型意象熵评价研究[J]. *机械设计*, 2016, 33(3): 105-108.
- SU Jian-ning, ZHANG Xin-xin, JING Nan, et al. Research on the Entropy Evaluation of Product Styling Image under the Cognitive Difference[J]. *Journal of Machine Design*, 2016, 33(3): 105-108.
- [20] 李愚, 卢纯福, 刘肖健, 等. 汽车外形设计的基因网络模型[J]. *计算机集成制造系统*, 2018, 24(5): 1249-1260.
- LI Yu, LU Chun-fu, LIU Xiao-jian, et al. Gene Network Model of Automobile Styling Design[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 24(5): 1249-1260.
- [21] NAGAMACHI M. *Kansei/Affective Engineering*[M]. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- [22] GERARDO B, WANG J. *Self-Organizing Sensory Systems*[C]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1990.
- [23] DORIGO M, MANIEZZO V, COLORNI A. Ant System: an Autocatalytic Optimizing Process Technical Report 91-016[J]. *Clustering*, 1991, 3(12): 340.
- [24] MARCO D, CHRISTIAN B. Ant Colony Optimization Theory: a Survey[J]. *Theoretical Computer Science*, 2005, 344(2-3): 243-278.
- [25] GHAFURIAN S, JAVADIAN N. An Ant Colony Algorithm for Solving Fixed Destination Multi-Depot Multi-

- ple Traveling Salesmen Problems[J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(1): 1256-1262.
- [26] LU Zhi-ying, GAO Shan, YAO Li. Distribution Network Planning Based on Shortest Path[J]. Journal of Central South University, 2012, 19(9): 2534-2540.
- [27] 苏建宁, 王瑞红, 赵慧娟, 等. 基于感性意象的产品造型优化设计[J]. 工程设计学报, 2015, 22(1): 35-41.
SU Jian-ning, WANG Rui-hong, ZHAO Hui-juan, et al. Optimization Design of Product Modeling Based on Kansei Image[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2015, 22(1): 35-41.
- [28] 范文, 余隋怀, 王文军, 等. 蚁群算法求解人机布局优化问题[J]. 机械科学与技术, 2013, 32(7): 955-962.
FAN Wen, YU Sui-huai, WANG Wen-jun, et al. Ant Colony Algorithm for Human-Machine Layout Optimization[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2013, 32(7): 955-962.
- [29] 杨洁, 杨育, 赵川, 等. 产品外形设计中客户感性认知模型及应用[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2010, 22(3): 538-544.
YANG Jie, YANG Yu, ZHAO Chuan, et al. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2010, 22(3): 538-544.
- [30] POLI R, KENNEDY J, BLACKWELL T. Particle Swarm Optimisation[J]. Journal of Xidian University, 1995, 42(1): 16-22.
- [31] CHAMAANI S, MIRTAHERI S A, TESHNEHLAB M, et al. Modified Multi-Objective Particle Swarm Optimization for Electromagnetic Absorber Design[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2008, 79: 353-366.
- [32] MOON S K, PARK K J, SIMPSON T W. Platform Design Variable Identification for a Product Family Using Multi-Objective Particle Swarm Optimization[J]. Research in Engineering Design, 2014, 25(2): 95-108.
- [33] 王亚辉, 余隋怀. 基于多目标粒子群优化算法的汽车造型设计决策模型[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(4): 681-688.
WANG Ya-hui, YU Sui-huai. Car Styling Design Decision-Making Model Based on Multi-Objective Particle Swarm Optimization[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(4): 681-688.
- [34] JIANG H M, KWONG C K, PARK W Y, et al. A Multi-Objective PSO Approach of Mining Association Rules for Affective Design Based on Online Customer Reviews[J]. Journal of Engineering Design, 2018, 29(7): 381-403.
- [35] 丁满, 孙伟, 徐江, 等. 考虑色彩意象不明确的产品色彩模糊优化设计[J]. 机械工程学报, 2011, 47(12): 185-190.
DING Man, SUN Wei, XU Jiang, et al. Product Color Fuzzy Optimum Design Considering Color Image Uncertainty[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(12): 185-190.
- [36] 张娜, 杨延璞. 产品造型感性评价中的粒子群优化共识达成机制[J]. 机械设计, 2017, 34(6): 119-123.
ZHANG Na, YANG Yan-pu. Consensus Reaching Mechanism for Product Form Kansei Evaluation Based on Particle Swarm Optimization[J]. Journal of Machine Design, 2017, 34(6): 119-123.
- [37] SAMPSON R J. Adaptation in Natural and Artificial Systems[J]. Siam Review, 1976, 18(3): 529-530.
- [38] HOLLAND H J. Adaptation in Natural and Artificial Systems[J]. Ann Arbor, 1992, 6(2): 126-137.
- [39] DUMA M, TWALA B. Sparseness Reduction in Collaborative Filtering Using a Nearest Neighbour Artificial Immune System with Genetic Algorithms[J]. Expert Systems with Applications, 2019, 132: 110-125.
- [40] MOHAMMADI K, AMELI F. Toward Mechanistic Understanding of Fast SAGD Process in Naturally Fractured Heavy Oil Reservoirs: Application of Response Surface Methodology and Genetic Algorithm[J]. Fuel, 2019, 253: 840-856.
- [41] KORKMAZ Y, BOYACI A, TUNCER T. Turkish Vowel Classification Based on Acoustical and Compositional Features Optimized by Genetic Algorithm[J]. Applied Acoustics, 2019, 154: 28-35.
- [42] WANG Shuang-bu, XIA Yu, WANG Rui-bin, et al. Optimal NURBS Conversion of PDE Surface-Represented High-Speed Train Heads[J]. Optimization and Engineering, 2019, 20(3): 907-928.
- [43] SHIEH M D, LI Y F, YANG C C. Comparison of Multi-Objective Evolutionary Algorithms in Hybrid Kansei Engineering System for Product Form Design[J]. Advanced Engineering Informatics, 2018, 36: 31-42.
- [44] 刘弘, 刘希玉. 支持外观造型创新设计的进化计算方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006(1): 101-107.
LIU Hong, LIU Xi-yu. An Evolutionary Computing Approach for Supporting Creative Configuration Design[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2006(1): 101-107.
- [45] 杨延璞, 余隋怀, 陈登凯. 运用遗传算法的产品造型设计方案优化方法[J]. 现代制造工程, 2012(3): 127-131.
YANG Yan-pu, YU Sui-huai, CHEN Deng-kai. Product Design Optimization Method Based on Genetic Algorithm[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2012(3): 127-131.
- [46] 胡伟峰, 赵江洪. 用户期望意象驱动的汽车造型基因进化[J]. 机械工程学报, 2011, 47(16): 176-181.
HU Wei-feng, ZHAO Jiang-hong. Automobile Styling Gene Evolution Driven by Users' Expectation Image[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(16): 176-181.

- 176-181.
- [47] DAWKINS R. The Blind Watchmaker[J]. Journal of Animal Ecology, 1986, 16(58): 423-424.
- [48] TAKAGI H. Interactive Evolutionary Computation: Fusion of the Capabilities of EC Optimization and Human Evaluation[J]. Proceedings of the Ieee, 2001, 89(9): 1275-1296.
- [49] 巩敦卫, 郝国生, 周勇, 等. 交互式遗传算法原理及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
GONG Dun-wei, HAO Guo-sheng, ZHOU Yong, et al. Theory and Applications of Interactive Genetic Algorithms[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.
- [50] YUAN Guo-shu, XIE Qing-sheng, PAN Wei-jie. Color Design Based on Kansei Engineering and Interactive Genetic Algorithm[J]. Academic Journal of Manufacturing Engineering, 2017, 15(3): 12-18.
- [51] BAKAEV M, GAEDKE M. Application of Evolutionary Algorithms in Interaction Design: from Requirements and Ontology to Optimized Web Interface[C]. 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, IEEE, 2016.
- [52] 徐江, 孙守迁, 张克俊. 基于遗传算法的产品意象造型优化设计[J]. 机械工程学报, 2007(4): 53-58.
XU Jiang, SUN Shou-qian, ZHANG Ke-jun. Product Image Form Optimization Design Based on Genetical Gorithm[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007(4): 53-58.
- [53] 苏建宁, 康亚君, 张书涛, 等. 面向认知主体的产品意象造型创新设计方法[J]. 现代制造工程, 2018(6): 108-113.
SU Jian-ning, KANG Ya-jun, ZHANG Shu-tao, et al. Innovative Design Method of Product Image Styling Oriented to Cognitive Subject[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2018(6): 108-113.
- [54] SRINIVAS M, PATNAIK L M. Adaptive Probabilities of Crossover and Mutation in Genetic Algorithms[J]. Systems, Man and Cybernetics, 1994(4): 656-667.
- [55] 宋红, 余隋怀, 王淑侠, 等. 基于可供性的自适应免疫遗传优化产品形态设计方法[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(6): 1308-1314.
SONG Hong, YU Sui-huai, WANG Shu-xia, et al. Affordance-Based Adaptive Immune Genetic Optimization of Shape Design Method[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(6): 1308-1314.
- [56] WANG Zeng, LIU Wei-dong, YANG Ming-lang, et al. A Multi-Objective Evolutionary Algorithm Model for Product Form Design Based on Improved SPEA2[J]. Applied Sciences, 2019, 9(14): 2944.
- [57] BHARDWAJ S, TEWARI S, JAIN S. Study on Future of Artificial Intelligence in Neural Network System[J]. International Journal of Scientific & Engineering Research, 2013, 4(6): 597.
- [58] HORTON E R. An Approach Toward a Physical Interpretation of Infiltration-Capacity. Soil Sci[J]. Soil Sc.soc.am.proc, 1941, 5(C): 124.
- [59] SCHAFFER J D, WHITLEY D, ESHELMAN L J. Combinations of Genetic Algorithms and Neural Networks[C]. IEEE, 1992.
- [60] RUMELHART E D, HINTON E G, WILLIAMS R J. Learning Representations by Back-Propagating Errors[J]. Nature, 1986, 323(3): 533-536.
- [61] MILLS P M, ZOMAYA A Y, TADÉ M O. Adaptive Model-Based Control Using Neural Networks[J]. International Journal of Control, 1992, 60(6): 1163-1192.
- [62] 李义宝, 张学勇, 马建国, 等. 基于 BP 神经网络的改进算法研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2005(6): 668-671.
LI Yi-bao, ZHANG Xue-yong, MA Jian-guo, et al. Study of Improving Algorithms Based on the BP Neural Network[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2005(6): 668-671.
- [63] 张硕, 吴俭涛. 基于 BP 神经网络的壁挂式充电桩产品形态研究[J]. 图学学报, 2017, 38(6): 865-868.
ZHANG Shuo, WU Jian-tao. Research on Form of Wall Set Charging Pile Base on BP Neural Network[J]. Journal of Graphics, 2017, 38(6): 865-868.
- [64] DIEGO-MAS J A, ALCAIDE-MARZAL J. Single Users' Affective Responses Models for Product Form Design[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2016, 53: 102-114.
- [65] TUNG Ting-chun, CHEN Hung-yuan. Application of Back-Propagation Neural Network-Based Approach to Icon Image Design[C]. IEEE, 2016.
- [66] 冯青, 吴梦迪, 余隋怀, 等. 基于 BP 神经网络的罐式车辆配色与评价方法研究[J]. 机械设计, 2019, 36(1): 118-123.
FENG Qing, WU Meng-di, YU Sui-huai, et al. Research of Tank Vehicle Colour Matching and Evaluation Method Based on BP Neural Network[J]. Journal of Machine Design, 2019, 36(1): 118-123.
- [67] ZADEH L A. Fuzzy Algorithms[J]. Information and Control, 1968, 12(2): 94-102.
- [68] WU H C. Linear Regression Analysis for Fuzzy Input and Output Data Using the Extension Principle[J]. Computers and Mathematics with Applications, 2003, 45(12): 1849-1859.
- [69] CHEN L H KO W C, YEH F T. Approach Based on Fuzzy Goal Programing and Quality Function Deployment for New Product Planning[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 259(2): 654-663.
- [70] CHAN L. A Systematic Approach to Quality Function Deployment with a Full Illustrative Example[J]. Omega, 2005, 33(2): 119-139.

- [71] WANG D, LI Z R, DEY N, et al. Case-Based Reasoning for Product Style Construction and Fuzzy Analytic Hierarchy Process Evaluation Modeling Using Consumers Linguistic Variables[J]. IEEE Access, 2017(5): 4900-4912.
- [72] 曾栋, 陈亚明. 模糊综合评判在产品造型设计中的应用研究[J]. 现代制造工程, 2010(8): 119-123.
ZENG Dong, CHEN Ya-ming. Application Research of Fuzzy Synthetic Evaluation in Product Sculpt Design[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2010(8): 119-123.
- [73] 杨超翔, 程建新, 丁伟, 等. 基于模糊分析的老年概念产品感性评价方法研究[J]. 包装工程, 2018, 39(10): 128-132.
YANG Chao-xiang, CHENG Jian-xin, DING Wei, et al. Evaluation of Product Conceptual Design Based on Fuzzy Analysis[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(10): 128-132.
- [74] PAWLAK Z. Rough Sets[J]. International Journal of Computer & Information Sciences, 1982, 11(5): 341-356.
- [75] PAWLAK Z, SKOWRON A. Rudiments of Rough Sets[J]. Information Sciences, 2007, 177(1): 3-27.
- [76] ZHAI L Y, KHOO L P, ZHONG Z W. A Dominance-Based Rough Set Approach to Kansei Engineering in Product Development[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(1): 393-402.
- [77] NISHINO T, NAGAMACHI M, OKUO H, et al. Rough Set Model and Its Application to Kansei Engineering[M]. University Electronic Press, 2008.
- [78] 胡名彩, 郭伏, 叶国全. 基于改进变精度贝叶斯粗糙集的感性知识获取[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2018, 39(12): 1794-1799.
HU Ming-cai, GUO Fu, YE Guo-quan. Kansei Knowledge Acquisition Based on the Improved Variable Precision Bayesian Rough Set[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2018, 39(12): 1794-1799.
- [79] SHIEH M D, YEH Y E, HUANG C L. Eliciting Design Knowledge from Affective Responses Using Rough Sets and Kansei Engineering System[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2016, 7(1): 107-120.
- [80] ZHU Guo-niu, HU Jie, QI Jin, et al. An Integrated AHP and VIKOR for Design Concept Evaluation Based on Rough Number[J]. Advanced Engineering Informatics, 2015, 29(3): 408-418.
- [81] DENG Li, WANG Guo-hua. Application of EEG and Interactive Evolutionary Design Method in Cultural and Creative Product Design[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2019(7): 1-16.
- [82] LI Z, SHI K, DEY N, et al. Rule-Based Back Propagation Neural Networks for Various Precision Rough Set Presented Kansei Knowledge Prediction: a Case Study on Shoe Product Form Features Extraction[J]. Neural Computing and Applications, 2017, 28(3): 613-630.
- [83] ALTSHULLER G S. Creativity as an Exact Science: the Theory of the Solution Inventive Problems[J]. Etc a Review of General Semantics, 1984(6).
- [84] 何川, 张鹏, 陈利琼. TRIZ 在概念设计中的应用[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2003(5): 19-23.
HE Chuan, ZHANG Peng, CHEN Li-qiong. TRIZ Applied in Conception Design[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2003(5): 19-23.
- [85] WANG C H. Using the Theory of Inventive Problem Solving to Brainstorm Innovative Ideas for Assessing Varieties of Phone-Cameras[J]. Computers & Industrial Engineering, 2015, 85: 227-234.
- [86] HARTONO M. The Extended Integrated Model of Kansei Engineering, Kano, and TRIZ Incorporating Cultural Differences into Services[J]. International Journal of Technology, 2016, 7(1): 97-104.
- [87] 张建敏, 王建伟, 杨勤, 等. 基于 TRIZ 理论的手扶式旋耕机造型设计研究[J]. 包装工程, 2019, 40(4): 133-139.
ZHANG Jian-min, WANG Jian-wei, YANG Qin, et al. The Modeling Design of Hand-held Tillers Based on TRIZ[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(4): 133-139.
- [88] AKAO Y. New Product Development and Quality Assurance Deployment System[J]. Standardisation and Quality Control, 1972, 25: 243-246.
- [89] 王二强, 余隋怀, 杜鹤民. QFD 和信息熵在油罐车改良设计中的应用研究[J]. 机械设计与制造, 2011(8): 60-62.
WANG Er-qiang, YU Sui-huai, DU He-min. Application of QFD and Information Entropy in Improved Design for the Tank Truck[J]. Machinery Design & Manufacture, 2011(8): 60-62.
- [90] WU C T, PAN T S, SHAO M H, et al. An Extensive QFD and Evaluation Procedure for Innovative Design[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013, 2013(8): 1-7.
- [91] DOLGUN L E, KÖKSAL G. Effective Use of Quality Function Deployment and Kansei Engineering for Product Planning with Sensory Customer Requirements: a Plain Yogurt Case[J]. Quality Engineering, 2018, 30(4): 569-582.
- [92] 李强, 刘计良, 张迎楠. 基于 QFD 的个性化定制产品规划模型[J]. 现代电子技术, 2018, 41(9): 137-141.
LI Qiang, LIU Ji-liang, ZHANG Ying-nan. QFD Based Product Planning Model with Personalized Customization[J]. Modern Electronics Technique, 2018, 41(9): 137-141.
- [93] STINY G, GIPS J. Shape Grammars and the Generative Specification of Painting and Sculpture[J]. Segmentation of Buildings Fordgeneralisation in Proceedings of

- the Workshop on Generalisation & Multiple Representation Leicester, 1971, 71: 1460-1465.
- [94] 卢兆麟, 汤文成, 薛澄岐. 简论形状文法及其在工业设计中的应用[J]. 装饰, 2010(2): 102-103.
LU Zhao-lin, TANG Wen-cheng, XUE Cheng-qi. Discussion on Shape Grammar and Its Application in Industrial Design[J]. Zhuangshi, 2010(2): 102-103.
- [95] SHARPE R B V A. Where We Have Been and Where We are Going[J]. The Hastings Center Report, 1999, 29(5): 38-40.
- [96] 王伟伟, 杨延璞, 杨晓燕, 等. 基于形状文法的产品形态创新设计研究与实践[J]. 图学学报, 2014, 35(1): 68-73.
WANG Wei-wei, YANG Yan-pu, YANG Xiao-yan, et al. Method of Product Form Design Based on Shape Grammar[J]. Journal of Graphics, 2014, 35(1): 68-73.
- [97] PUGLIESE M J, CAGAN J. Capturing a Rebel: Modeling the Harley-Davidson Brand through a Motorcycle Shape Grammar[J]. Research in Engineering Design, 2002, 13(3): 139-156.
- [98] 乔现玲, 余晓庆, 胡志刚, 等. 基于形状文法的汝官窑瓷器器形设计研究[J]. 中国陶瓷, 2016, 52(11): 98-102.
QIAO Xian-ling, YU Xiao-qing, HU Zhi-gang, et al. Method of Ruguan Kiln Porcelain Wares Form Design Based on Shape Grammar[J]. China Ceramics, 2016, 52(11): 98-102.
- [99] CHEN M, GE L I, WANG W W. Modeling Design of Smart Watches Based on Kansei Engineering and Shape Grammar[J]. Machine Design & Manufacturing Engineering, 2016.
- [100] SHEN Zhang-fan, XUE Cheng-qi, ZHANG Jing, et al. Research on the Style of Product Shape Based on NURBS Curve[C]. Cham: Springer International Publishing, 2017.
- [101] TOMOO H. Examples of Quantification Theory[J]. The Proceedings of the Institute of Statistical Mathematics, 1954, 2(1): 11-30.
- [102] 苏建宁, 李鹤歧. 应用数量化一类理论的感性意象与造型设计要素关系的研究[J]. 兰州理工大学学报, 2005(2): 36-39.
SU Jian-ning, LI He-qi. The Relationship between Perceptual Image and Modeling Design Elements Based on Quantitative Theory[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2005(2): 36-39.
- [103] 李辉, 韩娜, 黄灵阁, 等. 卷烟包装结构设计要素与感性意象关系模型研究[J]. 包装工程, 2016, 37(24): 176-179.
LI Hui, HAN Na, HUANG Ling-ge, et al. Relationship Model between Cigarette Packaging Structure and Kansei Image[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(24): 176-179.
- [104] 刘征宏, 潘伟杰, 吕健, 等. 基于多元线性回归的多维感性工学模型构建[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(12): 15-18.
LIU Zheng-hong, PAN Wei-jie, LYU Jian, et al. Multi-Dimensional KE Model Construction Based on Multiple Linear Regression[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2015(12): 15-18.
- [105] 杨程, 谭昆, 俞春阳. 基于评论大数据的手机产品改进[J/OL]. 计算机集成制造系统: 1-19[2020-01-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20190606.1053.008.html>.
YANG Cheng, TAN Kun, YU Chun-yang. Phone Product Improvement Based on Big Data of Comment[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems: 1-19 [2020-01-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20190606.1053.008.html>.
- [106] 周蕾, 薛澄岐, 汤文成, 等. 产品信息界面的用户感性预测模型[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(3): 544-554.
ZHOU Lei, XUE Cheng-qi, TANG Wen-cheng, et al. User Perceptual Prediction Model of Product Information Interface[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(3): 544-554.
- [107] VAPNIK V. A Note One Class of Perceptrons[J]. Automation and Remote Control, 1964(8).
- [108] 柴春雷, 李丹, 包德福, 等. 多维感性语义识别模型构建研究[J]. 机械设计, 2017, 34(3): 105-110.
CHAI Chun-lei, LI Dan, BAO De-fu, et al. Construction of Multi-Dimensional Kansei Semantic Identification Model[J]. Journal of Machine Design, 2017, 34(3): 105-110.
- [109] 李文华, 余隋怀, 于明玖, 等. 支持向量机回归模型在航空座椅造型眼动评价中的应用[J]. 机械科学与技术, 2018, 37(11): 1768-1775.
LI Wen-hua, YU Sui-huai, YU Ming-jiu, et al. Application of Support Vector Machine Regression Model in Aircraft Seating Styling Eye Movement Evaluation[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2018, 37(11): 1768-1775.
- [110] WOLD S, SJÖSTRÖM M, ERIKSSON L. PLS-regression: a Basic Tool of Chemometrics[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2001, 58(2): 109-130.
- [111] GÖKEN M, ALPPAY E C. A Case Study on Turkish Tea Glasses and Kansei Engineering[C]. Cham: Springer International Publishing, 2020.
- [112] SHIEH M D, YEY Y E. Developing a Design Support System for the Exterior Form of Running Shoes Using Partial Least Squares and Neural Networks[J]. Computers & Industrial Engineering, 2013, 65(4): 704-718.
- [113] SEMBIRING M T, ADHINATA K, WAHYUNI D, et

- al. Determining Kansei Words in Chocolate Product Development Model Design Based on Social Media Trend by Using Key Element Extraction (KEE) Algorithm[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 505: 12031.
- [114] JIAO Y, QU Q X. A Proposal for Kansei Knowledge Extraction Method Based on Natural Language Processing Technology and Online Product Reviews[J]. Computers in Industry, 2019, 108: 1-11.
- [115] WANG W M, WANG J W, LI Z, et al. Multiple Affective Attribute Classification of Online Customer Product Reviews: a Heuristic Deep Learning Method for Supporting Kansei Engineering[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2019, 85: 33-45.
- [116] 林丽, 高芸坤, 阳明庆, 等. 基于视觉认知理论的产品形态优化设计方法[J]. 包装工程, 2019, 40(8): 16-22.
- LIN Li, GAO Yun-kun, YANG Ming-qing, et al. Product Shape Optimization Design Method Based on Visual Cognition Theory[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(8): 16-22.
- [117] WANG Jing-jing. EEG-based Quantitative Analysis of Aesthetic Emotion in Clothing Design[J]. Translational Neuroscience, 2019, 10(1): 44-49.
- [118] SHI F Q, DEY N, ASHOUR A S, et al. Meta-Kansei Modeling with Valence-Arousal fMRI Dataset of Brain[J]. Cognitive Computation, 2019, 11(2): 227-240.
- [119] OHKURA M, AOTO T, ITO K, et al. Measurement and Evaluations of Kawaii Products by Biological Signals[M]. Singapore: Springer Singapore, 2019.
- [120] CHEN Zhi-ang, LIN Li. Emotional Experience Evaluation Method of Interaction Task Based on EEG Technology[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 573: 12022.
- [121] LI Yong-feng, SHIEH Meng-dar, YANG Chih-chieh. A Posterior Preference Articulation Approach to Kansei Engineering System for Product Form Design[J]. Research in Engineering Design, 2019, 30(1): 3-19.
- [122] TAN C J, NEOH S C, LIM C P, et al. Application of an Evolutionary Algorithm-Based Ensemble Model to Job-Shop Scheduling[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2019, 30(2): 879-890.
- [123] LIN Li, ZHAO Yan-zhe. Optimal Design of Product Culture Image Modeling Based on FNN Model and PSO Algorithms[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 573: 12025.
- [124] BHATTACHARYA A, GOSWAMI R T, MUKHERJEE K. A Feature Selection Technique Based on Rough Set and Improvised PSO Algorithm (PSORS-FS) for Permission Based Detection of Android Malwares[J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 2019, 10(7): 1893-1907.
- [125] 谢伟, 辛向阳, 胡伟锋. 产品设计中用户的内隐测量方法研究现状[J]. 机械设计, 2015, 32(2): 105-110.
- XIE Wei, XIN Xiang-yang, HU Wei-feng. Research Status on User Implicit Measurement Method in Product Design[J]. Journal of Machine Design, 2015, 32(2): 105-110.
- [126] BARGH J A, MORSELLA E. The Unconscious Mind[J]. Perspectives on Psychological Science, 2008, 3(1): 73-79.
- [127] 唐帮备, 郭钢, 王凯, 等. 联合眼动和脑电的汽车工业设计用户体验评选[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(6): 1449-1459.
- TANG Bang-bei, GUO Gang, WANG Kai, et al. User Experience Evaluation and Selection of Automobile Industry Design with Eye Movement and Electroencephalogram[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(6): 1449-1459.
- [128] ZHOU Guo-rui, ZHU Xiao-qiang, SONG Chen-ru, et al. Deep Interest Network for Click-Through Rate Prediction[C]. London: ACM, 2018.
- [129] ZHOU Guo-rui, MOU Na, FAN Ying, et al. Deep Interest Evolution Network for Click-Through Rate Prediction[J]. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2019, 33(1): 5941-5948.
- [130] PI Qi, BIAN Wei-jie, ZHOU Guo-rui, et al. Practice on Long Sequential User Behavior Modeling for Click-Through Rate Prediction[C]. Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining-KDD 19, 2019.