

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

王园园¹, 蒋超¹, 俞琳^{1,2}, 任艳博¹

(1.西安工程大学 服装与艺术设计学院, 西安 710048;

2.西北工业大学 现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 西安 710072)

摘要: **目的** 为提高机械产品表面涂装质感设计的效率, 对机械产品表面涂装质感设计方法进行深入研究。**方法** 基于感性工学, 从理论层面提出机械产品质感设计方法、流程及其关键技术。并通过搜集典型质感样本、典型质感视觉意象词汇, 进行视觉意象感性实验, 从而获取典型质感样本和典型质感视觉意象词汇的相关隶属度。利用 BP 神经网络, 实现机械产品表面涂装“视觉意象—质感参数”关联模型的构建。**结果** 以数码印花机为例, 当设定质感参数为“涂层粗糙度 0.2、涂层折射指数 1.18、涂层厚度 1.2”时, 质感视觉意象值为“安全的 3.132、简约的 2.657、美观的 3.089、稳定的 2.756、坚固的 2.842”, 该结果表明, “视觉意象—质感参数”关联模型具有较好的主观趋势, 可以满足用户的视觉意象需求。**结论** 所提出的机械产品表面涂装质感设计方法具有较好的可操作性和科学性, 可为机械产品表面涂装质感的设计提供参考。

关键词: 机械产品; 质感设计; 感性工学; 视觉意象; BP 神经网络

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)06-0056-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.06.007

Method of Mechanical Products Surface Coating Texture Design Based on Kansei Engineering and Visual Imagery

WANG Yuan-yuan¹, JIANG Chao¹, YU Lin^{1,2}, REN Yan-bo¹

(1.Apparel and Art Design College, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

2.Key Laboratory of Modern Design and Integrated Manufacturing Technology Ministry of Education,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

ABSTRACT: In order to improve the efficiency of the mechanical product surface coating texture design, the design method based on kansei engineering was studied in depth. Firstly, based on kansei engineering, the texture design method and process and key technology of mechanical product surface coating from the theoretical level was proposed. Secondly, for key technology, typical texture samples and typical texture visual imagery vocabulary were collected, conduct visual imagery sensitivity experiments to obtain the relative membership degree of typical texture samples and typical visual imagery vocabulary; Using BP neural network, the “visual imagery-texture parameter” correlation model of mechanical product surface coating was constructed; Finally, take the digital printing machine for example, when the texture parameters were “coating roughness 0.2, coating refractive index 1.18, coating thickness 1.2”, the texture visual imagery values were “safe 3.132, simple 2.657, beautiful 3.089, stable 2.756, solid 2.842”. The results show that the “visual imagery-texture parameter” correlation model had a better subjective trend and can meet the visual imagery needs of users. The method of mechanical products surface coating texture design was maneuverable and scientific, which can provide refer-

收稿日期: 2021-12-06

基金项目: 陕西省社会科学基金 (2019K036)

作者简介: 王园园 (1998—), 女, 硕士生, 主攻计算机辅助产品设计。

通信作者: 蒋超 (1987—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为计算机辅助工业设计、人机工程设计。

ence for the design of mechanical product surface coating texture.

KEY WORDS: mechanical product; texture design; kansei engineering; visual imagery; BP neural network

形态、色彩和质感是产品设计的核心要素和基础内容^[1-3]。前期研究发现,机械产品在形态方面相对固定、简单,其色彩设计已有较为深入的研究成果^[4-6],而其表面涂装质感设计一直以来未得到足够的重视和关注。表面涂装质感,作为机械产品外观重要的视觉要素之一,在很大程度上影响着用户的审美和情感体验。对产品表面涂装质感进行意象解读和研究,并基于用户的质感意象感知偏好,进行合理的产品表面涂装质感设计应用,可以有效提高用户对机械产品外观设计的视觉感官体验和满意度。

目前,质感设计在产品领域已有一定的研究。如汪颖等^[7]以地板作为研究对象,提出了一种基于基因表达式编程的材料质感偏好意象进化认知算法;周小溪等^[8]运用描述统计、探索性因子分析、多元回归分析等数理方法,对色织面料的材质特征进行了分析和挖掘;唐帮备等^[9]面向座椅利用织物材料,构建了工业设计材质用户视触觉感知体验的模糊综合评价模型;谈卫等^[10]根据感性工程学提出了基于视觉意象的飞机座舱内塑料材质设计方法;孙凌云等^[11]利用感性工程学构建了材料质感意象模型;张秦玮等^[12]利用色彩理论、主成分分析法等方法构建了“材质—要素—意象”之间的关系模型。综上,由于机械产品在材料工艺和表面处理上均具有一定特殊性,所以上述研究成果在机械产品领域设计应用时具有一定的局限性,需要专门对机械产品表面涂装质感意象进行研究。

对现有研究成果进行比较和分析发现,感性工学作为产品设计中以用户需求为导向的代表性方法之一^[13],具有极高的可操作性、可靠性和成熟度。其可以有效地将用户模糊的感性意象需求进行量化,并建立感性量和物理量之间的关系,从而进一步明确用户需求和设计目标,服务产品设计过程,提高产品设计效率。

以机械产品表面涂装质感为研究对象,通过建立机械产品表面涂装质感语意空间,并构建机械产品表面涂装“视觉意象—质感参数(Visual Imagery-Texture Parameter, VITP)”关联模型,提出一种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,希望以此提高用户对机械产品外观的视觉意象体验,并为机械产品的表面涂装质感设计提供有效参考。

1 设计方法及流程

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,通过量化用户模糊的感性需求,进一步明确设计目标,寻求最合理的设计要素,以此满足

用户需求。针对机械产品表面涂装质感设计,对设计流程进行研究和梳理,见图 1。

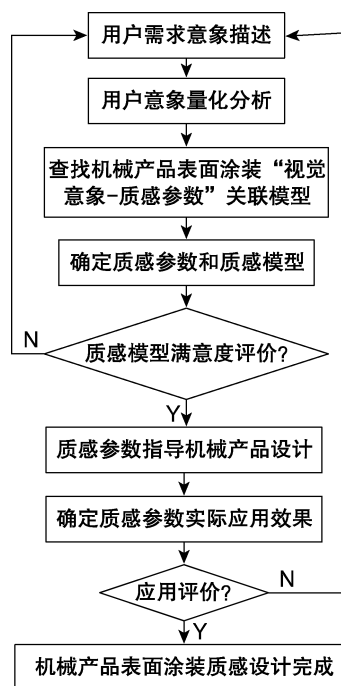


图 1 设计流程
Fig.1 Design process

为更好地理解这一设计流程,对图 1 进行如下描述。

- 1) 用户通过语言描述提出对机械产品表面涂装质视觉意象的模糊需求。
- 2) 运用感性工学和李克特量对用户的模糊需求进行量化和分析。
- 3) 基于机械产品表面涂装 VITP 关联模型,将量化后的用户质感视觉意象需求转化为最匹配的质感参数,并得到相应的质感模型。
- 4) 对选取的质感模型进行初步评价。评价通过,则继续下一步;如评价不通过,则返回第 1 步。
- 5) 将用户满意的质感模型应用于机械产品中,并得到实际应用效果。
- 6) 对应用实际效果再次进行评价。用户满意,则此次机械产品表面涂装质感设计完成;若不满意,则再次返回第 1 步。

2 VITP 关联模型构建

对机械产品表面涂装质感设计流程进行分析,其中 VITP 关联模型是重要工具和关键技术。对该模型的构建方法及流程进行深入分析和研究。

2.1 典型质感样本获取

机械产品表面涂装质感通常借助喷涂工艺来获取,最常用的表面喷涂质感主要为磨砂和光面2种。考虑到不同质感又具有不同的粗糙度,因此,实物质感模型制作存在数量多、成本高、耗时长等问题。为解决这些问题,研究利用虚拟现实技术,基于KeyShot 8软件构建渲染效果逼真的质感虚拟模型。

在KeyShot 8中,不同的表面质感可通过调节涂层粗糙度、涂层折射指数、涂层厚度3个质感参数进行模拟。此外,由于不同的材质基底对喷涂质感会产生不同影响,为保证研究的准确性,在软件中将基底的表面粗糙度统一设定为0.075(默认常用值)。由于过大的参数值不具有工程意义,结合渲染效果,将机械产品的质感参数值范围进行限定,见表1。一方面,为控制实验样本数量,提高实验的可操作性,另一方面,为保证质感样本的差异性,以取得显著的实验结果。文中采用正交实验法获取典型质感样本,即依据均匀筛选、可比性强的原则,从全部正交结果中挑选出典型质感样本进行视觉意象感性实验。

表1 KeyShot 8中机械产品质感参数范围
Tab.1 Range values of mechanical product texture parameters in KeyShot 8

质感类型	粗糙度	折射指数	厚度
喷涂磨砂质感	0~0.8	1~3	0~10

2.2 典型质感样本获取流程

典型质感视觉意象词汇获取流程如下:通过网络、杂志、论文等多种渠道收集描述物体质感的视觉意象词汇;采用问卷调查法,让被试在上述描述物体质感意象的词汇中勾选出常用的机械产品表面涂装质感视觉意象词汇。以心理学统计理论中常用的小概率事件^[14]作为指标筛选依据,对被试的勾选结果进行统计,从而初步筛选出能够描述机械产品表面涂装质感的视觉意象词汇;由于初步筛选出的词汇可能存在差异度不足的情况,采用多维尺度、阶层聚类和判别分析法^[10]进行再次筛选和验证,以获得高典型、强互斥的典型质感视觉意象词汇。

2.3 视觉意象感性实验

典型质感样本和典型质感视觉意象词汇获取完成后,应进行视觉意象感性实验,逐一对典型质感样本相应的视觉意象进行量化。采用李克特量表构建5级评价程度,邀请被试从典型质感视觉意象词汇中选择词汇进行评价,从而获取典型质感样本与典型质感视觉意象词汇的隶属度。

2.4 VITP 关联模型构建方法

视觉意象感性实验构建了典型质感样本与典型质感视觉意象词汇的关联关系。由于典型质感样本具

有相应且确定的质感参数,所以视觉意象词汇语意隶属度与质感参数也存在相应的关联关系,这种关系可被表达为VITP关联模型。在关联模型构建时,应首先利用皮尔逊(Pearson)系数进行线性相关验证,如具有线性相关关系,则采用线性回归分析法建立线性关联模型;如不具有明显线性关系,则利用神经网络建立非线性关联模型。

2.5 模型构建流程

为更清晰地展示机械产品表面涂装“质感视觉意象—质感参数”关联模型构建方法,对关联模型的构建流程进行整理和概括,见图2。

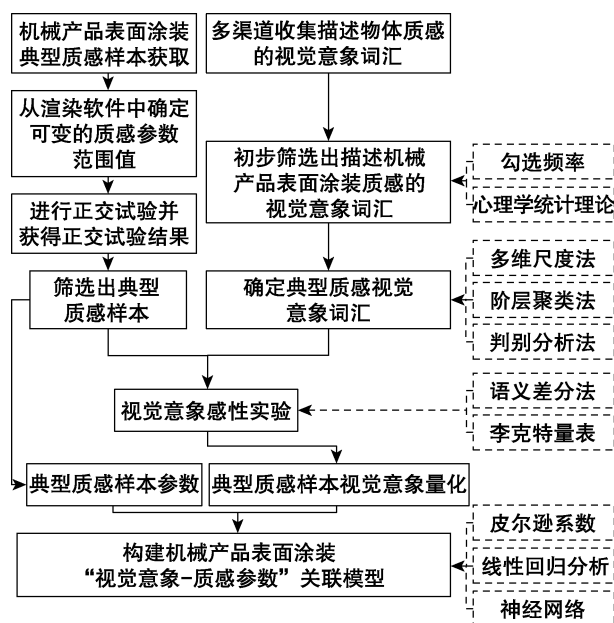


图2 机械产品表面涂装 VITP 关联模型构建流程
Fig.2 Construction process of “visual imagery-texture parameter” correlation model of mechanical product surface coating

3 验证实例

采用上述机械产品表面涂装质感设计方法对某型数码印花机进行质感设计,以验证文中所提出的方法的有效性和科学性。由于高光质感在真实环境中会使人产生眩光,容易导致工人误操作,降低机械产品的人机性能,所以主要针对表面喷涂的磨砂质感进行深入研究。

3.1 典型质感样本获取

在KeyShot 8中,磨砂表面喷涂效果的可变质感参数为3种,分别是粗糙度、折射度、厚度,因此将正交实验的因素确定为3,因素水平根据实际渲染质感样本的差别度来确定,由于实际渲染质感样本时发现在一定范围内改变质感参数,样本之间视觉差别度不显著,所以将实验的因素水平设定为6,磨砂质感正交实验见表2。其中,H为涂层粗糙度、R为涂层折射指数、T为涂层厚度。

表 2 磨砂质感正交实验
Tab.2 Orthogonal test schedule of frosted texture

序号	质感参数			序号	质感参数			序号	质感参数			序号	质感参数		
	H	R	T		H	R	T		H	R	T		H	R	T
1	0.05	1.0	0	10	0.1	2.2	6	19	0.4	1.0	0	28	0.6	2.2	6
2	0.05	1.4	2	11	0.1	2.6	8	20	0.4	1.4	2	29	0.6	2.6	8
3	0.05	1.8	4	12	0.1	3.0	10	21	0.4	1.8	4	30	0.6	3.0	10
4	0.05	2.2	6	13	0.2	1.0	0	22	0.4	2.2	6	31	0.8	1.0	0
5	0.05	2.6	8	14	0.2	1.4	2	23	0.4	2.6	8	32	0.8	1.4	2
6	0.05	3.0	10	15	0.2	1.8	4	24	0.4	3.0	10	33	0.8	1.8	4
7	0.1	1.0	0	16	0.2	2.2	6	25	0.6	1.0	0	34	0.8	2.2	6
8	0.1	1.4	2	17	0.2	2.6	8	26	0.6	1.4	2	35	0.8	2.6	8
9	0.1	1.8	4	18	0.2	3.0	10	27	0.6	1.8	4	36	0.8	3.0	10

为了便于比较不同磨砂质感之间的视觉意象差异，不同磨砂质感必须具有相同的固有色和环境光条件。设定固有色为 PANTONE 444C（C:58 M:47 Y:45 K:0），环境光则统一使用自制的工厂环境贴图素材。对正交实验结果中的典型磨砂质感样本进行仿真渲染，部分渲染结果，见图 3。

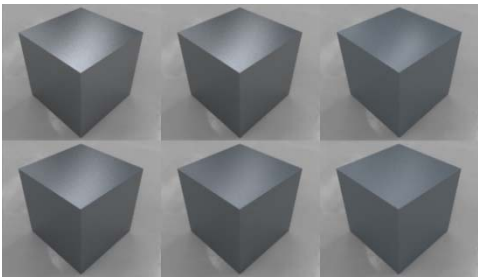


图 3 典型磨砂质感样本（部分）
Fig.3 Typical frosted texture samples (partial)

3.2 典型质感视觉意象词汇获取

由网络、杂志、论文等渠道，收集到描述物体质感视觉意象词汇共 120 个，对这些词汇进行编号，通

过调查问卷让被试（被试主要构成产品销售人员、纺织工人、机械产品设计师、纺织领域资深专家等）对符合描述数码印花机磨砂质感的视觉意象词汇进行勾选，并最终对各视觉意象词汇被勾选的频率进行统计和降序排列，见图 4。

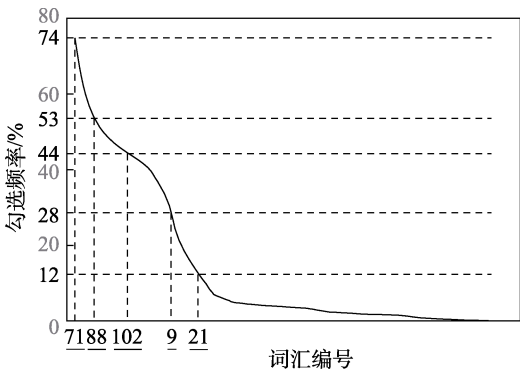


图 4 视觉意象词汇勾选频率分析
Fig.4 Frequency analysis on choosing visual imagery words

根据降序排列结果，将勾选频率小于 5%（常用小概率事件比例）的视觉意象词汇剔除，并初步筛选出视觉意象词汇 44 个，见表 3。将初步筛选出的 44

表 3 视觉意象词汇
Tab.3 Visual imagery words

编号	视觉意象词汇	编号	视觉意象词汇	编号	视觉意象词汇	编号	视觉意象词汇
05	耐用的	31	高级的	55	精密的	79	包容的
06	坚固的	32	科技的	60	成熟的	80	稳重的
09	新颖的	34	硬朗的	61	方便的	81	简约的
10	整洁的	35	协调的	66	昂贵的	83	现代的
12	稳定的	39	实用的	69	创新的	85	稳固的
19	简单的	40	刚硬的	71	安全的	88	高档的
20	均衡的	41	高端的	72	和谐的	93	规整的
22	亲和的	44	现代的	73	整洁的	100	有序的
25	理性的	49	美观的	74	专业的	103	庄严的
29	个性的	50	干净的	76	合理的	110	流畅的
30	沉稳的	51	自然的	77	坚硬的	116	大气的

个视觉意象词汇构建相似矩阵，具体步骤：要求被试将语义相似的词汇进行归类；统计 2 个词汇被归为 1 组的频次；依据频次将初步筛选的词汇构建成 44×44 的相似矩阵。

对视觉意象词汇进行阶层聚类时，须首先确定聚类群数。利用 SPSS 软件对相似矩阵进行多维尺度的展开，展开维度为 2~6。当展开到第 6 维时，展开结果具有较好的拟合劣度和优度，因此，以 6 维空间分布为特征量进行阶层聚类，聚类在 47 步时发生突变。综合利用聚类树状图发现，44 个视觉意象词汇应分为 5 组。

综上，指定阶层聚类群数为 5，进行阶层聚类，并利用判别分析法进行交叉验证，得到 44 个视觉意象词汇的样本分布，见图 5。

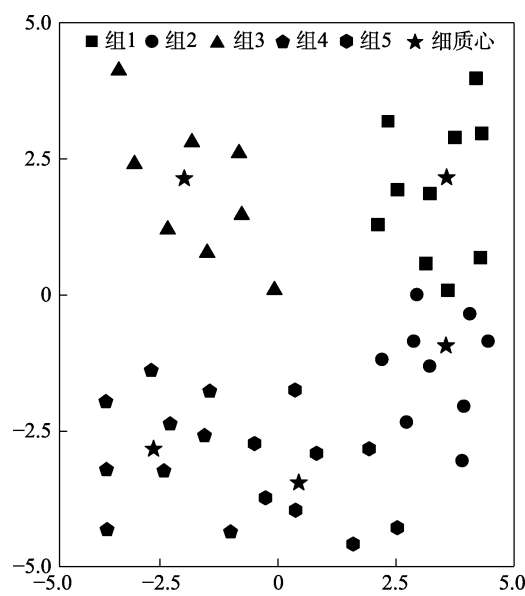


图 5 视觉意象词汇样本分析
Fig.5 Sample analysis on visual imagery vocabulary

通过对视觉意象词汇进行分组，可确定各组的细质心，将距离细质心位置最近的意象词汇作为描述机械产品表面涂装磨砂质感的典型视觉意象词汇。验证实例确定的典型词汇为安全的、简约的、美观的、稳定的、坚固的。

3.3 纺织机械磨砂质感的视觉特性量化

在完成典型磨砂质感样本和典型质感视觉意象词汇的获取后，应对纺织机械磨砂质感的视觉特性进行量化。具体包括：首先利用李克特量表构建 5 级评价尺度“极轻微、较轻微、普通、较强烈、极强烈”，分别对应分值 1~5；然后，通过调查问卷，让被试根据自身的主观感受对相应分值进行勾选，并计算平均值；最终，实现纺织机械典型磨砂质感视觉特性的量化。视觉特性量化调查问卷示例见表 4。由此得到统计结果，即为该磨砂质感样本的视觉意象语意隶属度。

3.4 VITP 关联模型构建

构建机械产品表面涂装 VITP 关联模型，应首先判断视觉意象词汇语意隶属度与质感参数间的相关类型。经过计算，两者的 Pearson 系数为 0.217。一般认为 Pearson 系数小于 0.3 则两者不具有显著的线性相关。实例中的视觉意象词汇语意隶属度和质感参数并不具有显著的线性相关关系，因此采用 BP 神经网络对机械产品表面涂装 VITP 关联模型进行构建。

根据质感参数可确定输入层为 3 个神经元，输出层为 5 个神经元。隐含层的神经元数目，依照李俊涛等的研究结果^[15]，确定最佳隐含层神经元个数为 10。BP 神经网络结构见图 6。设定误差目标为 10⁻⁴，模型网络训练收敛曲线，见图 7。

关联模型构建完成后，将模型的计算结果与用户的主观评价进行了相互验证。具体步骤：用户视觉意象需求获取及量化；根据机械产品表面涂装 VITP 关联模型和量化后的用户视觉意象需求，得出质感参数；参照获得的质感参数，利用 KeyShot 8 对某型数码印花机三维模型进行参数设置，并导出质感虚拟模型；验证用户对质感虚拟模型的视觉意象满意度。结果表明，构建的机械产品表面涂装 VITP 关联模型可以满足用户的视觉意象需求，与用户的主观评价趋势一致，由此判断模型具有较好的可靠性。

数码印花机质感虚拟效果见图 8，质感参数为“涂层粗糙度 0.2、涂层折射指数 1.18、涂层厚度 1.2”，对应质感视觉意象值为“安全的 3.132、简约的 2.657、

表 4 视觉特性量化调查问卷
Tab.4 Visual feature quantification questionnaire

质感序号	示例质感	意象词汇（编号）	程度及量化分数				
			极轻微	较轻微	普通	较强烈	极强烈
1		安全的（71）	1	2	3	4	5
		简约的（81）	1	2	3	4	5
		美观的（49）	1	2	3	4	5
		稳定的（12）	1	2	3	4	5
		坚固的（06）	1	2	3	4	5

美观的 3.089、稳定的 2.756、坚固的 2.842”。最终，结合企业形象色，对验证实例的色彩进行深入设计，得到数码印花机外观设计效果，见图 9。

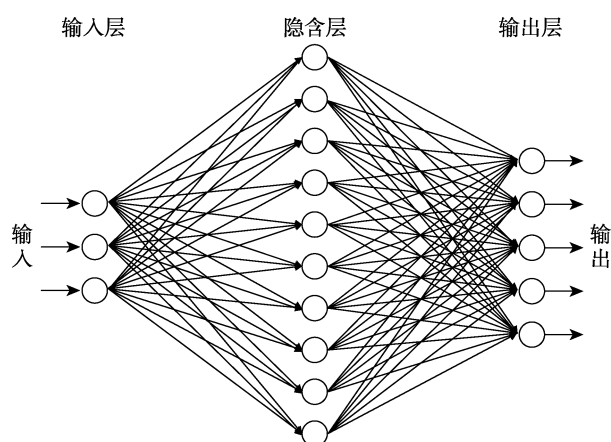


图 6 BP 神经网络结构
Fig.6 BP neural network structure

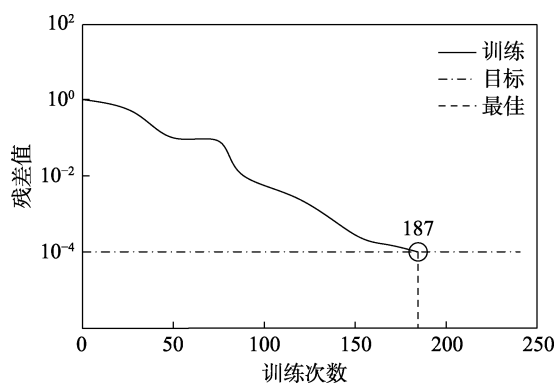


图 7 BP 神经网络训练收敛曲线
Fig.7 BP neural network training convergence curve

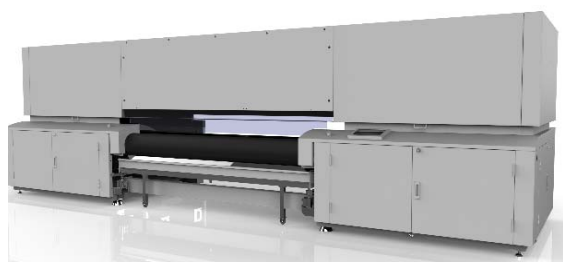


图 8 数码印花机质感虚拟效果
Fig.8 Texture virtual effect of digital printing machine

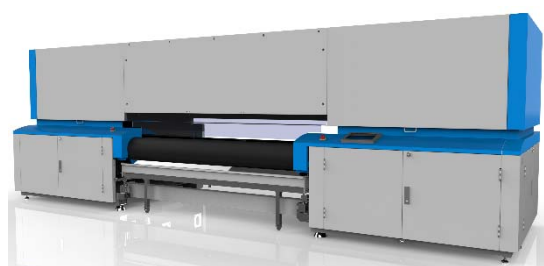


图 9 最终设计方案
Fig.9 Final design

4 结语

文中针对机械产品的表面涂装质感设计问题，基于感性工学和视觉意象，提出了一种较为系统的机械产品表面涂装质感设计方法。该方法可满足用户对机械产品表面涂装质感设计的需求，并有效优化设计流程，提高设计效率。所构建的机械产品表面涂装 VITP 关联模型，能够将用户主观的质感视觉意象需求转化为具体的质感参数，为机械产品表面涂装质感设计过程提供准确的设计辅助。文中并未充分讨论产品色彩对质感意向表达的影响，在后期的研究工作中，笔者将针对产品色彩对质感意象的具体影响进行研究和探讨。

参考文献：

- [1] 刘征, 孙守迁, 潘云鹤. 面向设计知识重用的产品外观分类[J]. 机械工程学报, 2009, 45(4): 19-24.
LIU Zheng, SUN Shou-qian, PAN Yun-he. Classifying Product Form for Design Knowledge Reuse[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(4): 19-24.
- [2] VAN A, JOAN E. Valid Knowledge for the Professional Design of Large and Complex Design Processes[J]. Design Studies, 2005, 26(4): 379-404.
- [3] OWEN C L. Design Research: Building the knowledge base[J]. Design Studies, 1998, 19(1): 9-20.
- [4] 刘蓓贝, 张融, 陈旭, 等. 基于大数据的产品色彩设计[J]. 包装工程, 2019, 40(14): 228-235.
LIU Bei-bei, ZHANG Rong, CHEN Xu, et al. Product Color Design Based on Big Data[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(14): 228-235.
- [5] 霍丽晓, 檀润华. 基于参数化的产品单一色彩设计方法[J]. 包装工程, 2019, 40(20): 200-209.
HUO Li-xiao, TAN Run-hua. A Product Monochromatic Design Method Based on Parameterization[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(20): 200-209.
- [6] 林晨晔. 基于用户体验的产品色彩定向设计方法[J]. 包装工程, 2019, 40(22): 46-49.
LIN Chen-ye. Oriented Design Methodology of Product Color Based on User Experience[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(22): 46-49.
- [7] 汪颖, 张三元, 张克俊, 等. 产品材料质感偏好意象进化认知算法与系统[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(4): 762-770.
WANG Ying, ZHANG San-yuan, ZHANG Ke-jun, et al. Preference Learning for Evolutionary Cognition Algorithm and System of Product Material Texture[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(4): 762-770.
- [8] 周小溪, 梁惠娥, 陈潇潇, 等. 春夏季衬衫用色织面料材质的感性评价[J]. 纺织学报, 2016, 37(8): 59-64.
ZHOU Xiao-xi, LIANG Hui-e, CHEN Xiao-xiao, et al. Sensibility Assessment of Spring and Summer Shirt Yarn-dyed Fabrics[J]. Journal of Textile Research, 2016, 37(8): 59-64.

(下转第 68 页)