

面向 ID&E 感性认知协同的机床外观造型设计研究

陈天辰^{1,2*}, 黄艳群², 张大卫²

(1.天津职业技术师范大学, 天津 300222; 2.天津大学 机械工程学院, 天津 300072)

摘要: **目的** 为了解决机床防护外观设计过程中工业设计与工程的感性认知协同问题, 更好地寻求和增强双方对机床外观的认知共识, 提高设计的效率和明确性, 进而提高我国机床产业的整体竞争力。**方法** 将扎根理论的定性研究与感性工学的定量研究相结合, 首先通过扎根理论聚类并提炼工业设计与工程领域存在共识的感性意向词汇; 然后, 使用语义差异法对代表性样本进行影响因子和造型特征元素分析, 明确双方可协同的机床设计元素与感性认知的映射关系; 最后, 基于相应具体案例需求进行设计实践。**结论** 明确了机床外观设计过程中关于工业设计和工程双方存在协同认知的若干影响因子及其对应的典型感性词汇, 构建了面向机床防护外观设计流程的 ID&E 感性认知协同系统, 为机床外观设计领域提供有效的方法参考和优化思路。

关键词: ID&E 协同; 扎根理论; 感性工学; 机床外观设计; 多元回归

中图分类号: TB472 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3563(2024)04-0096-11

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.04.010

Machine Tool Appearance Design for ID&E Collaborative Perceptual Cognition

CHEN Tianchen^{1,2*}, HUANG Yanqun², ZHANG Dawei²

(1.Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China;

2.School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the problem of perceptual cognition collaboration between industrial design and engineering in the process of machine tool protection appearance design to better seek and enhance the consensus cognition of both sides on the machine tool appearance and improve the efficiency and clarity of the design, thus improving the overall competitiveness of China's machine tool industry. The qualitative research of grounded theory was combined with the quantitative research of Kansei engineering. Firstly, the grounded theory was used to cluster and extract the common perceptual image words in the field of industrial design and engineering. Then, the semantic difference method was used to analyze the impact factors and modeling feature elements of the representative samples, and the mapping relationship between the machine tool design elements and perceptual cognition that could be coordinated by both sides was clarified. Finally, design practice was carried out based on the corresponding specific case requirements. Several influencing factors and corresponding typical perceptual terms of collaborative cognition between industrial design and engineering in the process of machine tool appearance design are defined, and ID&E perceptual cognition collaborative system for machine tool protection appearance design process is constructed, which provides effective method reference and optimization ideas for the field of machine tool appearance design.

KEY WORDS: ID&E collaborative; grounded theory; Kansei engineering; machine tool appearance design; multiple regression

近年来随着我国实体制造业的飞速发展, 机床制造逐渐向设计、制造和服务一体化的综合产业转变。

然而在实际的产品研发过程中, 工业设计与工程 (Industrial Designers and Engineers, ID&E) 之间的

收稿日期: 2023-09-25

基金项目: 国家工信部面向机床行业大中型数控机床关键加工装备项目 (TC210H035-008)

*通信作者

观点和认知结果时常会产生冲突^[1]。尽管在机床制造业当中跨学科合作已成常态,但在设计制造过程中对 ID&E 认知协同的关注依然不足,这既增加了沟通成本,还降低了机床产品的整体竞争力。对于机床外观设计,感性认知是 ID&E 十分核心的协同空间之一,本文将从感性认知协同的角度入手,结合扎根理论和感性工学实验方法,深入分析和探索 ID&E 之间在机床外观设计上存在共识性的感性认知协同要素,通过双方共识性的协同感性认知词汇和设计元素映射关系,构建面向机床外观设计的 ID&E 感性认知协同系统,并应用于具体案例之中。

1 机床外观设计中的 ID&E 协同问题

现代制造业产品的复杂性和竞争性需要不同职能部门将创新产品在概念化、开发和商业化方面的专业知识有效地整合^[2]。而有效的沟通和跨领域联系则是新产品研发成功的主要因素^[3]。作为跨学科合作中产生问题和冲突较多的工作组合类型之一^[4],ID&E 的协同问题由来已久,在产品设计的整体流程中一直存在沟通不力的问题^[5]。

工业设计和工程之间的知识体系差异在一定程度上体现在了双方人员面对同一目标的认知差异上。工业设计基于美学、语文学等学科对产品形式进行定义。采用开放式的解决方案,利用审美本能和试错来体现设计的个人创造力,更注重图形、色彩和造型等视觉上的表现。这种表现行为通常是“以行动为导向”的隐性知识,不能用技术理性的方法论范式来描述^[6]。而工程制造则常采用基于科学的问题解决方法,倾向于把问题精确化,并把重点放在功能、规格和性能上^[7]。这就是说工业设计领域主要关注产品的视知觉感受和用户体验,而工程设计则更加关注具体的实施技术、功能和可靠性^[8]。这种迥异的思维差异使得在面对同一目标产品的研发过程中,双方的沟通协调成本大幅提升。尽管有 Quality Function Deployment(QFD)等 ID&E 协同工具^[9]、对跨职能团队合作进行优化的专业间协商机制^[10]、培养专门且具有边界跨越的团队技能^[2]等 ID&E 协同方法,但现有研究多是主要针对工程一方的单向优化,且流程较为复杂。在面对某一具体产品的 ID&E 协作机制上,并没有形成一套面向双方的、简易且综合的协同机制。

在机床产品的外观防护设计中,外观设计和防护加工装配分别由工业设计和工程制造领域决定。因此在 ID&E 之间寻求有效沟通与共识是影响机床最终产品质量的重要因素之一。目前对机床外观防护的设计流程依然从工业设计师提供概念草图进行单向沟通的形式开始,但由于存在模棱两可的视觉不确定性,仅使用草图进行沟通使得工程设计师无法更加准确地表述,以理解和识别相关技术信息^[11]。只有当团队开发出一系列共同的可适词汇,并通过理解信息

内容中的沟通代码和语言时,沟通才能变得准确和有效^[12]。对此,必须通过图形以外的,诸如语言或人工制品等形式来辅助表达设计^[13]。通过多种表达形式的复合方式来构建一个可适(Adaptable)系统^[14],以此来精确地传递 ID&E 双方都共同认可且符合双方经验范畴和知识认知体系的符号,以使通信更加有效。在机床防护外观的设计、生产和装配过程中,ID&E 双方对功能、成本和审美等领域都有着各自不同的符号认知系统。因此,构建一个双方共同认可的共识性认知框架来寻求有效协同是十分必要的。尽管 IPD(Integrated Product Development)^[15]等概念被用来协调 ID&E 的合作效率,但就机床外观设计的 ID&E 协同设计优化上还鲜有相关的研究。

鉴于高级知识体系的多元性和差异性,感性认知被认为在构建共识性的认知框架方面具备更多的优势,感性工学(Kanse Engineering)因此得到了研究者的普遍关注^[16]。作为心理学和工学的交叉融合学科,感性工学主要以工程技术为手段,通过将人的感觉量化以明确其与工学之间的量化映射关系^[17]。相较于传统人机工程学对产品实用性和功能性的关注,感性工学更加关注产品给消费者所带来的情感享受、愉悦程度等感性特征^[18]。虽然语义差异法(Semantic Differential, SD)等感性工程学设计方法已经在机床外观设计研究中普遍存在,但传统的 SD 法因受测者的主观感情评价的不确定性,往往会产生一定误差^[19],并没有很好考虑到 ID&E 之间不同认知模式可能带来的感性认知差异。这就需要在一定程度上优化测试群体和感性词汇的选择和提取方法,明确符合 ID&E 双方经验范畴和知识认知体系的共识性感性认知符号是十分必要的。

2 机床外观设计中 ID&E 的感性认知协同分析

2.1 受验者与典型共识样本选择

为了尽可能兼顾 ID&E 群体的差异性、体现感性意向提取的客观性,以及确保实验人员的认知结构与知识体系对本次实验的影响,本实验从总共 5 家机床设计与制造企业和高等教育机构中遴选经验丰富的工业设计师和工程设计师参与测试及访谈。其中大型企业与双一流高校 7 人、中型企业与普通高校 7 人、小型企业与高等专科学校 6 人。整体 ID&E 领域比例为 1:1,女性 4 名,男性 16 名。受验者年龄为 20~45 岁。遴选过程中为确保实验结果的准确性和完整性,受验者的职业背景和对机床产业的实际认知经验被作为重要遴选标准,以求测试者能够更好地代表 ID&E 领域双方的行为认知特征。

作为用户对产品形态及其构造在情感和认知维度上的一种视觉表现^[20],具象化的感性意象集合也是

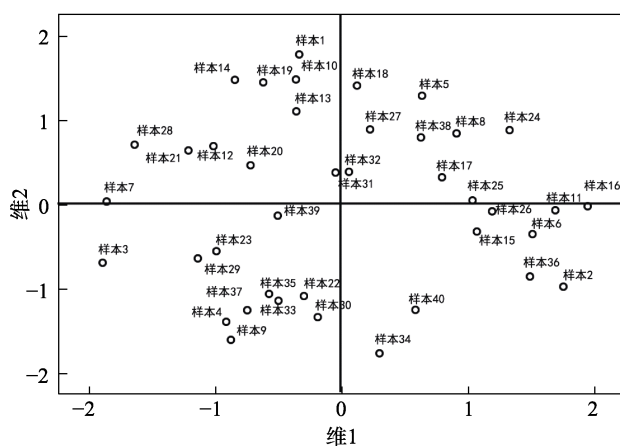
寻求 ID&E 观念沟通协同的基础。因此代表样本的筛选是至关重要的第一步。通过互联网收集了包括 19 个主要机床品牌的 521 个样本作为初始样本集。类型涉及各类卧式、立式加工中心和各类磨床。通过行业专家、文献资料等的相关分析和建议,进一步筛选出 40 个机床样本并请 ID&E 受验者根据主观感受对样图进行感受分类。

在充分考虑到受验者可能存在的迥异取向和思维方式的前提下,请 ID&E 受验者分别根据各自的感性认知来对样本进行分类。受验人员根据样本造型特点,将样本进行“2 组—4 组—8 组”的三次递进分类。随后,计算三次分类同组样本间的平均相似度,

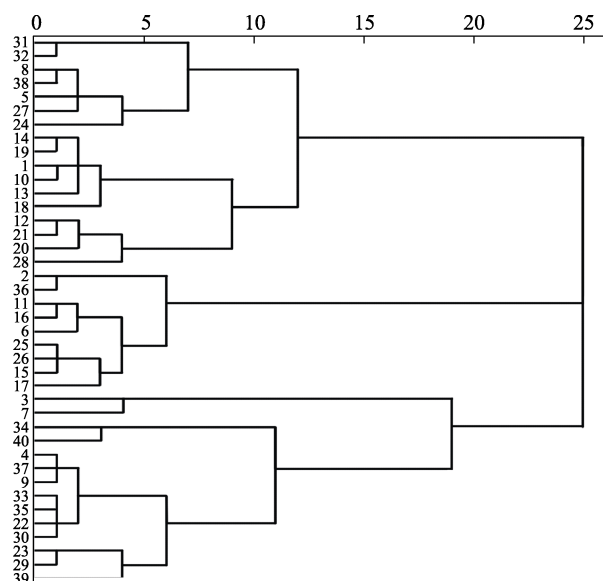
具体计算见式(1)。

$$S = \frac{M_1\alpha + M_2\beta + M_3\gamma}{M_1 + M_2 + M_3} \quad (1)$$

式中: S 为平均相似度; M_1 、 M_2 、 M_3 分别指任意两个样本在 1~3 次分层时被分到同一组的总次数,并且两个样本分在同一组时只计算递进分阶最高的那组; α 、 β 、 γ 分别为三次分组权重项,赋值分别为 0.25、0.5 和 0.75。得到相似度矩阵,并将相似度矩阵导入 SPSS 软件中进行多维尺度分析。结果提示拟合度量值 Stress 为 0.27,相关系数平方值 RSQ 大于 0.6,拟合度可接受(如图 1 所示)。结合专家意见,筛选出 ID&E 存在共识性的典型样本 6 例,见图 2。



a 相似度矩阵的多维尺度分析



b 相似度矩阵的聚类结果

图 1 相似度矩阵分析及结果

Fig.1 Clustering analysis and results of similarity matrix



图 2 典型样本
Fig.2 Typical sample

2.2 感性意象词汇提取与维度分析

采用对扎根理论的定性方法^[21],对受验者进行访谈。询问关于机床外观设计影响因素的相关话题并随着访谈进行适当追问和记录。通过对访谈信息进行一级开放式编码,将记录的资料进行词频分析后,根据分析结果来划分和界定概念,明确相应的范畴,并通

过此范畴来对资料信息进行定性聚类。在深入分析访谈资料后发现, ID&E 双方对机床外观感性意象协商的共识空间可分为外观感受和操作感受两大类,这也验证了双方彼此关注的核心领域正是来自双方不同的教育背景和认知经验。ID&E 双方对机床外观造型认知中可能存在的协同障碍也需要在这两个框架内寻求协商和沟通。通过词频分析在访谈资料中提取了若干高频词汇,并结合 ID&E 共识表达工具^[22]围绕访谈高频词汇对受验者进行深入测试、整理与核对,最终得到 15 个主范畴概念及其对应的 15 对共识性评价词汇(如表 1 所示)。其中,外观上的 ID&E 共识范畴包括美感、时尚、完整、色彩、软硬、精致、档次、清晰和综合感受。考虑到鲜艳的色彩搭配在机床操作过程中对使用者产生的一系列心理和生理影响的不可控性,结合案例样式将有关色彩的词汇组合中的消极侧定为鲜艳,积极侧定为淡雅。操作上 ID&E 共识范畴则主要包括安全感、可靠性、需求感、效率感和舒适感。

表 1 扎根访谈中部分词汇要素解码信息
Tab.1 Decoding information of some lexical elements

凝练词对	主范畴	概念范畴
丑陋-美观	外观的美感程度	整体设计审美上的愉悦感
过时-现代	外观的时尚程度	外观上是否反应时代感和现代感
孤立-组合	外观的完整程度	模块化整合程度, 整体的零散或一体化的感受
鲜艳-淡雅	外观的色彩感受	舒适的色彩设计, 清晰明确的标识系统等
柔和-坚固	外观的软硬感受程度	视觉上的材料质感和整体的软硬线条感受
危险-安全	操作上的安全感程度	是否能让操作者感受到安全感
可疑-可靠	操作上的可靠程度	整体观感和操作上是否有可靠、耐用的感受
粗糙-精致	外观的精致程度	整体视觉感受上是否给人以精密、细致感
传统-科技	外观的科技感程度	系列外观是否能直观地感受到创新与科技感
低端-高档	外观的档次感程度	整体设计是否体现“高级感”, 表现产品的昂贵、高档
弃用-想用	操作上的需求感程度	是否对机床的使用上存在抵触或需求心理
混乱-清晰	外观上的信息清晰程度	各种标识的数量与位置是否合理
复杂-易懂	外观上的综合感受	结构布局、操作方式对操作者的影响
阻滞-速度	操作上的效率感受状态	操作的流畅程度, 面板控制与运行情况
呆板-便利	操作上的舒适程度	操作是否省力、便捷、智能和方便

为了进一步明确上述 ID&E 共识性词汇在具体设计中所对应的外观设计元素, 基于 15 个核心词对使用 SD 法对典型样本进行评估^[23]。请 ID&E 受验者分别对 6 个典型样本进行基于 15 个词对的感性态度评价, 按照 Likert 量表的 7 分制态度量评价进行评分, 赋值为[-3,+3]。在这个系统中, 尺度的负向极端表明词对的消极程度, 而正向极端则表示词对的积极程度。例如, 对“危险-安全”语义词对来说, 最左边的-3 代表“非常危险的”, 最右边的 3 代表“非常安全的”, 中间的 0 点代表“中等”。接下来, 受验者基于此规则对 6 个典型产品进行评估, 试验后通过对意

象词汇对应评分的计算, 得出每个样本对每个感性意象词对的意象平均值, 见表 2。

由于语义词汇组多于 10 个, 过多描述的变量会导致研究分析过程复杂化, 因此使用因子分析法 (Factor Analysis) 从词汇变量中提取主要共同因子^[24]。将原始数据导入 SPSS 软件进行标准化处理后进行因子分析。首先采用 KMO 和 Bartlett 球形度检测法进行检验^[25], KMO 值为 0.811, 大于 0.5, 提示因子分析可行。得到 Bartlett 球形度检验 $P=0.00$, 数值小于 0.01, 说明各个变量之间具备强相关性, 适合进行因子分析 (如表 3 所示)。

表 2 感性意象均值
Tab.2 Mean value of perceptual image

词对	样本 1	样本 2	样本 3	样本 4	样本 5	样本 6	均值
丑陋-美观	1.25	1.2	2.25	1.25	2.05	0.25	1.35
过时-现代	1.4	1.95	1.95	2.25	2.4	1.2	1.86
孤立-组合	1.55	2.05	2.15	1.7	2.25	2.1	1.97
鲜艳-淡雅	1.75	1.8	2.25	1.6	1.7	-0.95	1.36
柔和-坚固	2.2	2.2	2.05	2.15	2.15	1.7	2.08
危险-安全	2.05	1.9	2.5	1.9	2.4	1.05	1.97
可疑-可靠	2.45	1.95	1.65	2.05	2.5	1.25	1.98
粗糙-精致	1.65	1.8	2.2	2.05	2.5	0.85	1.84
传统-科技	0.95	1.3	1.9	1.8	1.95	0.9	1.47
低端-高档	1.55	1.6	2.15	1.35	1.9	1.6	1.69
弃用-想用	2	1.7	2.5	1.8	1.45	0.9	1.72
混乱-清晰	1.8	1.65	2.15	1.7	1.95	1.3	1.76
复杂-易懂	0.75	1.2	1.8	1.4	1.75	0.5	1.23
阻滞-速度	1.35	1.7	1.4	1.7	2.2	1.4	1.63
呆板-便利	2.1	1.25	1.9	1.75	2.3	1.1	1.73

表 3 KMO 和 Bartlett 球形度检测结果
Tab.3 KMO and Bartlett sphericity test results

KMO 取样 适切性量数	Bartlett 球形度检验		
	近似卡方	自由度	显著性
0.811	568.721	105	0.000

随后,对数据使用主成分分析来寻找共同因子个数。通过分析 15 个共识性词汇组合最终提取了 4 个因子,与初期针对感性意象词汇的分析形成的假设有

表 4 感性意象词对的因子分析结果
Tab.4 Factor analysis results of perceptual image word pairs

成分	初始特征值			提取载荷平方和			旋转载荷平方和		
	总计	方差百分比	累积/%	总计	方差百分比	累积/%	总计	方差百分比	累积/%
1	4.954	33.026	33.026	4.954	33.026	33.026	2.544	16.957	16.957
2	1.560	10.399	43.425	1.560	10.399	43.425	2.494	16.625	33.582
3	1.393	9.285	52.709	1.393	9.285	52.709	2.053	13.686	47.268
4	1.204	8.027	60.736	1.204	8.027	60.736	2.020	13.468	60.736
5	0.831	5.538	66.274						
6	0.768	5.121	71.395						
7	0.753	5.023	76.418						
8	0.667	4.444	80.862						
9	0.583	3.888	84.750						
10	0.502	3.346	88.096						
11	0.439	2.925	91.021						
12	0.400	2.669	93.690						
13	0.364	2.427	96.117						
14	0.309	2.058	98.175						
15	0.274	1.825	100.000						

表 5 因子载荷矩阵
Tab.5 Factor load matrix

词对 编号	成分			
	1	2	3	4
词对 1	0.139	0.688	0.158	0.261
词对 2	0.237	0.272	-0.102	0.637
词对 3	0.752	-0.037	-0.002	0.199
词对 4	0.039	0.461	0.236	0.490
词对 5	0.067	-0.134	0.185	0.795
词对 6	0.047	0.275	0.564	0.421
词对 7	-0.045	-0.009	0.848	0.227
词对 8	0.352	0.363	0.236	0.531
词对 9	0.671	0.361	0.031	0.247
词对 10	0.698	0.358	0.144	-0.077
词对 11	0.247	0.744	0.167	-0.039
词对 12	0.313	0.081	0.675	-0.008
词对 13	0.064	0.784	-0.036	0.086
词对 14	0.716	0.041	0.315	0.192
词对 15	0.394	0.268	0.480	-0.107

了一定的差异,其特征值分别是 4.954、1.560、1.393 和 1.204。旋转后的方差解释率分别为 33.026%、10.399%、9.285%和 8.027%,总累计方差贡献率为 60.737% (如表 4 所示)。

可以发现因子分析将扎根聚类的两大框架进一步细化析出的 4 个因子。为了明晰分析结果,在得到因子个数之后需要对因子进行相应的属性分析,从而了解各个因子提示的具体含义和信息情况。因此,继续利用 SPSS 软件对因子数据采用正交旋转法以得到最终的因子载荷矩阵 (如表 5 所示)。

结合访谈记录对因子映射的词汇进行主成分分析可以发现,相较 ID&E 外观与操作的基础认知框架,成分分析的结果提示了 ID&E 对机床外观设计的感性认知存在 4 个共同的影响因子。因子 1 包含了“孤立-组合”“传统-科技”“低端-高档”“阻滞-速度”4 组词对,通过分析该集合的评价尺度可以发现,该集合的关注意象在于模块化的、迭代与增强的、新技术的、昂贵高级的和流畅高效率的,代表着 ID&E 群体对机床外观上最直接的功能性认知共识,因此可以将此集合视为功能认知因子;因子 2 包含了“丑陋-美观”“弃用-想用”“复杂-易懂”3 组词对,该集合关注的方向在于整体观感上的愉悦、方便易用的观感,以及积极的使用冲动,包含了大量无法用单个评价尺度量化的综合感知和模糊观感,体现了 ID&E 双方观念差异上的共识性描述,可以将之称为观念态度因子;因子 3 包含了“危险-安全”“可疑-可靠”“混乱-清晰”“呆板-便利”4 组评价词对,该集合涉及 ID&E 群体的安全观感、可靠感和舒适感等操作感知的共识性描述,因此可以将之称为人机交互因子;因子 4 包含了“过

时-现代”“鲜艳-淡雅”“柔和-坚固”“粗糙-精致”, 分别对应了时代感、色彩、线条和体块的审美感知, 是较为明显的审美意象因子, 反映了 ID&E 在审美倾向上的共识性描述。功能、观念、人机和审美 4 个共识性感性意象因子共同构成了机床外观设计中 ID&E 的感性认知协同维度, 见表 6。

表 6 四个因子的维度分析
Tab.6 Dimensional analysis of the four factors

四个因子维度	词对编号	词对
功能认知因子	词对 3	孤立-组合
	词对 9	传统-科技
	词对 10	低端-高档
	词对 14	阻滞-速度
人机交互因子	词对 6	危险-安全
	词对 7	可疑-可靠
	词对 12	混乱-清晰
	词对 15	呆板-便利
审美意象因子	词对 2	过时-现代
	词对 4	鲜艳-淡雅
	词对 5	柔和-坚固
	词对 8	粗糙-精致
观念态度因子	词对 1	丑陋-美观
	词对 11	弃用-想用
	词对 13	复杂-易懂

为了进一步确定 4 个协同维度中出最具代表性的感性意象词对, 对以上 15 组形容词对的因子载荷重新进行聚类分析并结合因子分析描述, 凝练出了“传统-科技”“可疑-可靠”“柔和-坚固”“复杂-易懂”4 组具有代表性的重要感性意象共识词对。可以发现以上词汇均为游离于 ID&E 双方认知框架边界的、相对中性的描述词汇, 具备较为纯粹的“形而上”感知意向, 也以此营造了 ID&E 之外第三方的交际空间。结合前文提取出针对每个典型样本的代表性词对评价均值, 见表 7。

表 7 典型样本的代表性词对评价均值
Tab.7 Mean values of representative word pairs of typical samples

样本编号	传统-科技	可疑-可靠	柔和-坚固	复杂-易懂
样本 1	0.95	2.45	0.75	2.20
样本 2	1.30	1.95	1.20	2.20
样本 3	1.90	1.65	1.80	2.05
样本 4	1.80	2.05	1.40	2.15
样本 5	1.95	2.50	1.75	2.15
样本 6	0.90	1.25	0.50	1.70

3 造型要素与意象词汇的映射关系

3.1 设计要素分析

结合造型设计的点、线、面、体, 以及色彩等因

素对典型样本的分析研究可见, 机床外观一般可分为视觉印象模块和视觉细节模块, 前者包括外罩结构、外罩线条和色彩; 后者包括防护门、观察窗、门把手、机脚、指示灯、控制面板、按键、电控柜等组成部分^[26]。因此, 根据对机床外观视觉印象模块和视觉细节模块的分析可知, 机床外观感性意象设计的影响要素分别为: 外罩结构、外罩线条、防护门样式、观察窗样式、门把手线条、色彩、色彩比例、机脚、指示灯样式、控制面板、按键样式、排屑装置位置、电控柜位置和标牌共 14 个可形成视觉共识的造型特征。综合了专家访谈法和问卷调查法, 在 ID&E 受验群体中将 14 个造型特征按照重要程度进行排列, 最终选取了对机床外观造型影响较大的 5 个造型特征: 外罩线条、外罩结构、防护门、观察窗和色彩。将造型特征依次编号并在 5 个主要造型特征的集合下细分出 14 个特征元素, 分别用字母表示, 见表 8。

表 8 各结构的特征元素
Tab.8 Characteristic elements of each structure

名称	外罩结构 (A)	外罩线条 (B)	防护门 (C)	观察窗 (D)	色彩 (E)
元素	几何型	直角	单开门	完整	大量色彩
	流线型	倒角	双开门	分割	局部色彩
	不规则型	混合		混合	黑白灰

根据数量化 I 类理论的原理^[27], 对代表样本的造型设计要素编码进行哑变量化处理, 最后得到只包含“0”和“1”的矩阵, 见表 9。

3.2 ID&E 感性认知协同的锚点分析

结合前文得到的感性意象共识词对的平均值和造型设计矩阵, 对每个造型特征要素进行多元线性回归分析。将造型设计要素矩阵作为自变量 $\mathbf{X}$, 感性意象评价作为因变量 Y , 将 f 个造型设计特征中的第 n 个特征的元素类别用 e_n 表示, 则可用式 (2) 来表示 ID&E 之间产生共识性的感性意象评价 Y 与造型设计要素矩阵 $\mathbf{X}$ 之间的线性关系, 发现机床外观造型及感性意向词汇与 ID&E 协同的作用锚点。

$$Y_i = \sum_{n=1}^f \sum_{k=1}^{e_n} a_{nk} \mathbf{X} + \varepsilon_i \tag{2}$$

式中: a_{nk} 为第 n 个造型设计要素的第 k 类常数; ε_i 则表示第 i 次抽样的随机误差项。将 ID&E 的共识性感性意象词汇的评价均值和造型特征的设计要素矩阵导入 SPSS 统计软件进行多元线性回归分析, 由于自变量为哑变量, 因此使用 Logistic 回归模型对自变量 $\mathbf{X}$ 和因变量 Y 进行相关性的回归分析, 并基于相关性系数总结出机床外观造型中 ID&E 感性认知协同的优化建议, 见表 10~11。

表 9 造型设计要素矩阵
Tab.9 Matrix of modeling design elements

特征	特征元素	样本 1	样本 2	样本 3	样本 4	样本 5	样本 6
外罩结构 (A)	几何型 (A1)	1	1	1	1	0	0
	流线型 (A2)	0	0	0	0	0	0
	不规则型 (A3)	0	0	0	0	1	1
外罩线条 (B)	直角 (B1)	1	1	1	0	0	0
	倒角 (B2)	0	0	0	0	0	0
	混合 (B3)	0	0	0	1	1	1
防护门 (C)	单开门 (C1)	1	0	1	1	1	0
	双开门 (C2)	0	1	0	0	0	1
观察窗 (D)	完整 (D1)	1	0	1	0	0	1
	分割 (D2)	0	1	0	0	1	0
	混合 (D3)	0	0	0	1	0	0
色彩 (E)	大量色彩 (E1)	0	0	0	0	0	1
	局部色彩 (E2)	1	1	1	0	0	0
	黑白灰 (E3)	0	0	0	1	1	0

表 10 回归分析相关性系数表
Tab.10 Correlation coefficient of regression analysis

特征	特征元素	传统-科技		复杂-易懂		可疑-可靠		柔和-坚固	
		皮尔逊相关性	Sig. (双尾)	皮尔逊相关性	Sig. (双尾)	皮尔逊相关性	Sig. (双尾)	皮尔逊相关性	Sig. (双尾)
外罩结构 (A)	几何型 (A1)	0.190	0.718	0.333	0.519	0.172	0.744	0.173	0.743
	流线型 (A2)								
	不规则型 (A3)	-0.190	0.718	-0.333	0.519	-0.172	0.744	-0.173	0.743
外罩线条 (B)	直角 (B1)	0.216	0.682	0.202	0.701	-0.284	0.585	0.392	0.442
	倒角 (B2)	0.229	0.663	0.524	0.286	0.823*	0.044	0.139	0.793
	混合 (B3)	-0.579	0.228	-0.958**	0.003	-0.744	0.090	-0.682	0.136
防护门 (C)	单开门 (C1)	-0.027	0.960	0.404	0.427	0.812*	0.050	0.024	0.963
	双开门 (C2)	-0.229	0.663	-0.524	0.286	-0.823*	0.044	-0.139	0.793
观察窗 (D)	完整 (D1)	-0.876*	0.022	-0.505	0.307	-0.203	0.700	-0.894*	0.016
	分割 (D2)	0.256	0.625	0.404	0.427	0.406	0.425	0.355	0.490
	混合 (D3)	0.620	0.190	0.101	0.849	-0.203	0.700	0.539	0.270
色彩 (E)	大量色彩 (E1)	-0.579	0.228	-0.958**	0.003	-0.744	0.090	-0.682	0.136
	局部色彩 (E2)	0.952**	0.003	0.238	0.650	0.210	0.689	0.866*	0.026
	黑白灰 (E3)	-0.552	0.256	0.505	0.307	0.365	0.477	-0.380	0.458

注：表中 Sig. (双尾) 小于 0.05 且大于 0.01 时为 “*”，提示强相关性；小于等于 0.01 时为 “**”，提示显著强相关性。

表 11 机床外观设计感性优化取向
Tab.11 Perceptual optimization orientation of machine tool appearance design

感性意向词汇	外罩结构 (A)	外罩线条 (B)	防护门 (C)	观察窗 (D)	色彩 (E)
易懂	几何型 (A1)	倒角 (B2)	单开门 (C1)	分割 (D2)	黑白灰 (E3)
科技	几何型 (A1)	倒角 (B2)	双开门 (C2)	分割 (D2) /混合 (D3)	局部色彩 (E2)
可靠	几何型 (A1)	倒角 (B2)	单开门 (C1)	分割 (D2)	局部色彩 (E2)
坚固	几何型 (A1)	直角 (B1)	双开门 (C2)	混合 (D3)	局部色彩 (E2)
复杂	不规则型 (A3)	混合 (B3)	双开门 (C2)	混合 (D3)	大量色彩 (E1)
传统	不规则型 (A3)	混合 (B3)	单开门 (C1)	完整 (D1)	大量色彩 (E1)
可疑	不规则型 (A3)	混合 (B3)	双开门 (C2)	完整 (D1) /混合 (D3)	大量色彩 (E1)
柔和	不规则型 (A3)	混合 (B3)	单开门 (C1)	完整 (D1)	大量色彩 (E1)

综上所述,结合机床外观的 5 个共识造型特征及其 14 个特征元素,通过功能、观念、人机和审美 4 个协同维度,初步构建了以“易懂-复杂”“科技-传统”“可靠-可疑”“坚固-柔和”等 4 个典型共识认知词汇所锚定的面向机床外观设计的 ID&E 感性认知协同系统(Perceptual Cognitive Coordination System, PCCS),以此在机床外观设计过程中对 ID&E 群体产生相对等效的认知协同作用。

其中, ID&E 对“易懂”“科技”“可靠”“坚固”等正面感性认知在几何形外罩和倒角的线条轮廓上达成了协同共识。对“科技”和“坚固”的感性认知能够在双开门的防护门设计上寻求共识协同,而“易懂”和“可靠”的感性认知则通过单开门的设计来协同。另外,相比单一观察窗,分割或混合多个观察窗在 ID&E 的感性认知协同中更能带来积极的共识体验。而在色彩设计上令人意外的是,在设计中运用大量的色彩反而会带来“复杂”“传统”“可疑”等负面共识认知。这可能与 ID&E 群体对机床这一领域的安全性、功能主义等共识观念有关。因此在进行机床防护造型设计时应当准确把握 ID&E 感性认知协同系统的关键共识词汇,以此作为设计流程中协同交互的必要参考来提高效率。

4 机床防护外观造型设计方案实践

值得一提的是,在一些情况下,外观防护的加工制造受制于成本、供应链、产品族系(Product Family),以及钣金加工等一系列外部条件的制约,实际上对 ID&E 的协同造成了一定的影响。因此,当外部制约条件被引入整体设计的框架后, PCCS 系统需要针对条件进行一定的锁项调整。

在本研究实际机床项目的需求中,品牌型号族系的要求、色彩、辅助图形、钣金加工工艺限制等都作

为不可更改项在 PCCS 中被锁定。在此前提下,首先将机床外观的 5 个共识造型特征及其 14 个特征元素交给由 12 人构成的 ID&E 群体混合的工作群组(工业设计、工程和需求方比例为 1:1:1)。随后,基于协同维度和锚定词汇对造型特征进行任意组合。再在群组中通过九阶喜好标度法筛选出 6 个基础设计样式,并形成了如图 3 所示的设计样稿。其中,防护结构采用 5 个几何形和 1 个作为柔和感性意向备选方案的不规则形。在充分评估锁定项相关条件限制的前提下,采用顺位法通过网络和现场访谈的方式对 ID&E 及需求市场方投放问卷 40 份,再次进行共识性和满意度顺位排序,结果显示样式 1、样式 4、样式 5 在 ID&E 及需求方均获得了较高的满意度和共识。

最后,结合锁定项将 3 种样式进行融合拓展,整体轮廓结构和线条确定为直线几何形,防护门结构采用正面双开、侧面单开的双门样式,兼顾“科技”“坚固”“易懂”“可靠”的认知共识,并以此弥补了观察窗不足的问题。在配色上以黑、白、灰与族系色结合的线条穿插方式体现出造型的美感和层次变化,弱化色彩本身带来的不确定性和可能存在的协同障碍。形成最终方案并通过三维建模渲染出造型设计方案,效果见图 4~5。

针对最终方案,在 ID&E 及需求群体中重新进行了直接感性评估。在 50 名评估者中, Likert 态度测试结果倾向积极者占比超过 70%。随后,围绕最终方案做进一步的 IPA 分析以验证效果满意度情况,将功能、观念、人机和审美 4 个协同维度中的“易懂-复杂”“科技-传统”“可靠-可疑”“坚固-柔和”8 个典型词汇作为象限因子进行 Likert 态度平分,再从同一批评估者中收集对词汇意向的期望分和实际感受分,通过计算得到各自的均值(如表 12 所示),并使用通用 IPA 评分表(如表 13 所示)分析结果(如图 6 所示)。

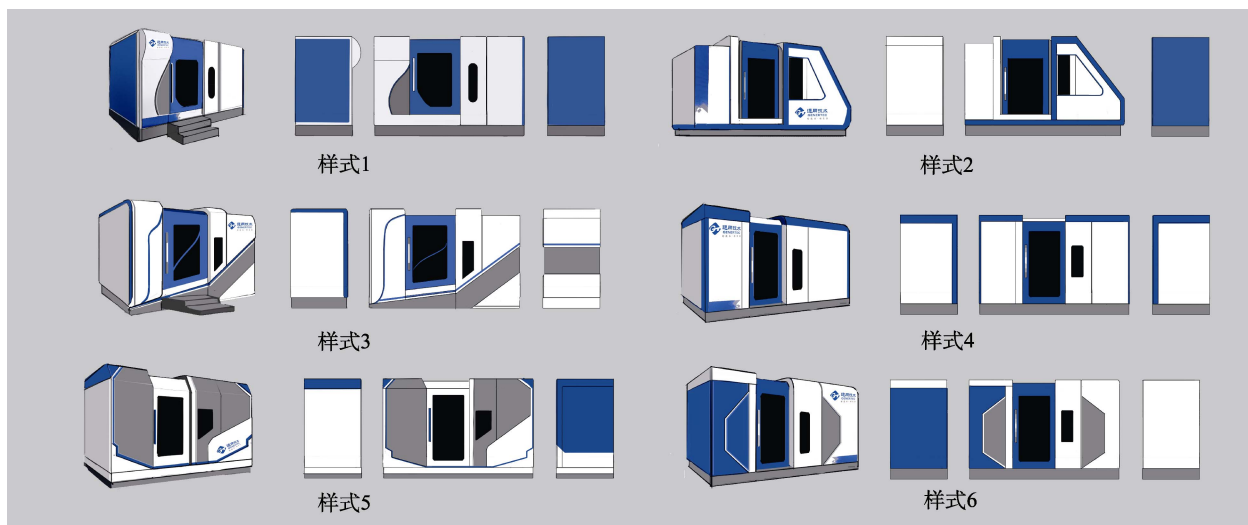


图 3 初始概念样式
Fig.3 Original conceptual style

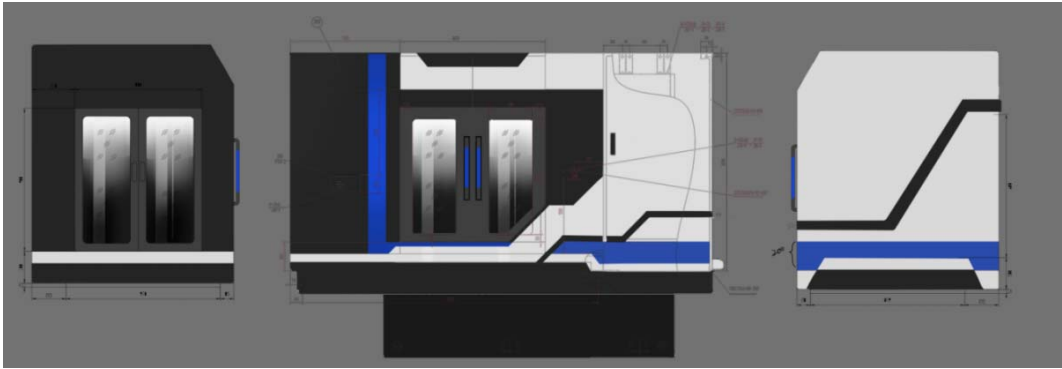


图 4 优化概念样式
Fig.4 Optimized conceptual style

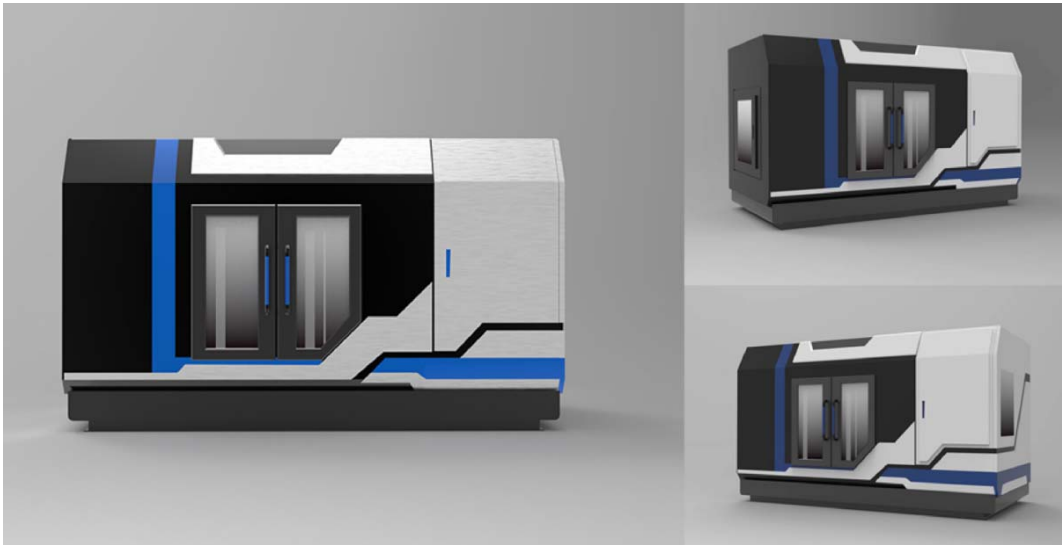


图 5 3D 效果预览
Fig.5 3D effect preview

表 12 各因子均值
Tab.12 Mean of factors

象限因子	期望意向	实际感知
易懂	4.80	4.20
科技	4.74	4.34
可靠	5.00	4.50
坚固	5.00	4.60
复杂	1.62	1.90
传统	2.36	1.74
可疑	1.00	1.46
柔和	1.28	1.10

从图 6 中可知，第一象限中的“易懂”“科技”“可靠”“坚固”意味着作为 4 个协同维度中的典型意向词汇，评估者的期望最高且对实际设计样式的感知也很高；第三象限中出现的“复杂”“传统”“可疑”“柔和”代表着机床外观设计需要摒弃或弱化的感性意向，表现为期望较低，其在实际的感知中也较低。分析结果整体上表明，来自需求及市场方的评估者对外观设计的期望与实际设计样式的感知

表 13 最终方案 IPA 评分表
Tab.13 IPA rating of the final proposal

维度	影响因子	分值
期望意向	极度摒弃	1
	摒弃	2
	一般	3
	需要	4
	非常重要	5
实际意向	完全无感	1
	无感	2
	一般	3
	有感	4
	深刻有感	5

情况较为吻合，期望高的感知意向得到了满足，期望低的感知意向也被抑制。验证结果表明，即使在锁定项的制约条件的影响下，面向机床外观设计的 ID&E 感性认知协同系统依然能够在一定程度上协同 ID&E 双方的工作，满足需求及市场方对特定感性意向的期望。

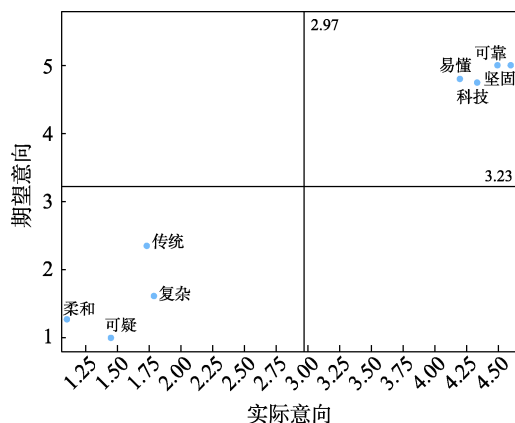


图6 IPA 分析结果
Fig.6 IPA analysis results

5 结语

本研究从工业产品设计中 ID&E 的认知协同偏差入手,通过扎根理论结合感性意向词汇分析法明确了在机床外观设计流程中 ID&E 间可协同的共识性造型特征及其特征元素、协同影响维度、典型词汇构成的,面向机床外观设计的 ID&E 感性认知协同系统,并基于此进行了相应的设计实践。在为机床防护外观造型设计流程方法提供更加科学可行的 ID&E 协同建议的同时,也为同类产品的外观造型设计过程中类似的 ID&E 协同障碍问题提供了颇具价值的借鉴与参考方法。最终设计方案通过 ID&E 双方及需求客户的评估,被认为是可接受的和优异的,验证了面向机床外观设计的 ID&E 感性认知协同系统的效果及可行性,也进一步表明本研究在机床防护外观造型设计的方法和流程优化上具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] PERSSON S. Industrial Design and Engineering Design Interaction: Studies of Influencing Factors in Swedish Product Developing Industry[D]. Goteborg: Chalmers University of Technology, 2002.
- [2] EDMONDSON A C, NEMBARD I M. Product Development and Learning in Project Teams: the Challenges are the Benefits[J]. Journal of Product Innovation Management, 2009, 26 (2): 123-138.
- [3] ROTHWELL R. Successful Industrial Innovation: Critical Factors for the 1990s[J]. R&D Management, 1992, 22(3): 221-239.
- [4] VON SAUCKEN C, SCHROER B, LINDEMANN U. Industrial Designers and Engineers in Product Development. Conflicts and Approaches for Improving Collaboration[C]// Proceedings of the 4th World Conference on Design Research. Delft: IASDR, 2011.
- [5] PEI E, SELF J A. Product Design and the Role of Representation: Foundations for Design Thinking in Practice[M]. Boca Raton: CRC Press, 2022.
- [6] DORST K, DIJKHUIS J. Comparing Paradigms for Describing Design Activity[J]. Design Studies, 1995, 16(2): 261-274.
- [7] COELHO D A. Advances in Industrial Design Engineering[M]. London: Intechopen, 2013.
- [8] HUBKA V, EDER W E. Theory of Technical Systems: A Total Concept Theory for Engineering Design[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2012.
- [9] ULRICH K T, EPPINGER S D. Product Design and Development[M]. Boston: McGraw-Hill Inc, 2000.
- [10] BROWN J S, DUGUID P. Knowledge and Organization: A Social-practice Perspective[J]. Organisation Science, 2001, 12(2): 198-213.
- [11] STACEY M, ECKERT C. Against Ambiguity[J]. Computer Supported Cooperative Work, 2003, 12(2): 153-183.
- [12] PERSSON S, WARELL A. Relational Models between Industrial Design and Engineering Design: A Conceptual Model for Interdisciplinary Design Work[C]// Proceedings of the 6th Asian Design International Conference. New York: Association for Computing Machinery, 2003.
- [13] GOLDSCHMIDT G. Capturing Indeterminism: Representation in the Design Problem Space[J]. Design Studies, 1997, 18(4): 441-455.
- [14] SHANNON C E. A Mathematical Theory of Communication[J]. The Bell System Technical Journal, 1948, 27(3): 379-423.
- [15] GERWIN D, BARROWMAN N J. An Evaluation of Research on Integrated Product Development[J]. Management Science, 2002, 48(7): 938-953.
- [16] NAGAMACHI, M. Kansei Engineering: A New Ergonomic Consumer-oriented Technology for Product Development[J]. International Journal of Industrial Ergonomics 1995, 15: 3-11.
- [17] 石小涛, 郭霞, 鲁子涵, 等. 基于感性工学的驾舱座椅 CMF 研究及中式元素设计应用[J]. 包装工程, 2023, 44(6): 441-448.
SHI X T, GUO X, LU Z H, et al. CMF Design and Application of Chinese Elements in Cockpit Seat Based on Kansei Engineering[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(6): 441-448.
- [18] 李兰友, 陆金桂, 张建德. 基于产品基因的感性意象设计[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2019, 41(1): 71-78.
LI L Y, LU J G, ZHANG J D. Kansei Image Design on Product Genes Basis[J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2019, 41(1): 71-78.
- [19] 曾栋, 程海峰, 李坤刚, 等. 感性工学在汽车造型设计中的应用现状与发展趋势[J]. 现代制造工程, 2019(3): 148-153.
ZENG D, CHENG H F, LI K G, et al. Research Status

- and Development Trend of Kansei Engineering in Automobile Styling[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2019(3): 148-153.
- [20] 王雪洁, 肖旺群. 基于感性意象的工业机器人造型设计研究[J]. *机械设计*, 2016, 33(8): 117-120.
WANG X J, XIAO W Q. Research on Modeling Design of Industrial Robot Based on Perceptual Image[J]. *Journal of Machine Design*, 2016, 33(8): 117-120.
- [21] 李晓华, 李纪珍, 高旭东. 角色认同与创业机会开发: 基于扎根理论的技术创业研究[J]. *南开管理评论*, 2022, 25(3): 73-86.
LI X H, LI J Z, GAO X D. Role Identity and Entrepreneurial Opportunity Development: Research of Technology Start-ups Based on Grounded Theory[J]. *Nankai Business Review*, 2022, 25(3): 73-86.
- [22] PEI E, LAN R, EVANS M A. Development of a Tool for Building Shared Representations Among Industrial Designers and Engineering Designers[J]. *CoDesign*, 2010, 6(3): 139-166.
- [23] 陈金亮, 赵锋, 李毅, 等. 基于感性工学产品设计方法研究[J]. *包装工程*, 2019, 40(12): 162-167.
CHEN J L, ZHAO F, LI Y, et al. Product Design Method Based on Kansei Engineering[J]. *Packaging Engineering*, 2019, 40(12): 162-167.
- [24] 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 G Q, JIANG N, ZHANG P, et al. Modeling of Children's Companion RoBot Based on Perceptual Engineering[J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(4): 166-171.
- [25] 曹玉姝, 崔庆康, 项松. 基于感性工学的通用飞机涂装设计方法研究[J]. *包装工程*, 2023, 44(2): 48-55.
CAO Y S, CUI Q K, XIANG S. General Aircraft Painting Scheme Design Method Based on Kansei Engineering[J]. *Packaging Engineering*, 2023, 44(2): 48-55.
- [26] 卢晓梦. 数控机床外观造型设计中的审美分析[J]. *装饰*, 2007(3): 106-107.
LU X M. Aesthetic Analysis of Designing the Form of NC Machine Tool[J]. *Zhuangshi*, 2007(3): 106-107.
- [27] 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, 31(2): 36-39.
SU J N, LI H Q. Investigation of Relationship of Form Design Elements to Kansei Image by Means of Quantification- I Theory[J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2005, 31(2): 36-39.

(上接第 76 页)

- [42] 叶平, 宋爽, 何雷, 等. 基于弹簧机构的宇航员抗阻力训练器[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(23): 1-7.
YE P, SONG S, HE L, et al. Astronaut Resistance Training Device Based on Spring Mechanism[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(23): 1-7.
- [43] 帅令, 杨昌棋, 杨明坤. 天宫二号太空跑台的设计缺陷分析[J]. *机械管理开发*, 2018, 33(6): 1-3.
SHUAI L, YANG C Q, YANG M K. Design Defect Analysis of Tiangong-2 Space Race Platform[J]. *Mechanical Management and Development*, 2018, 33(6): 1-3.
- [44] 王新凤. 宇航员太空舱生活方式研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
WANG X F. A Study on the Lifestyle of Astronauts in Spacecraft[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.