

基于眼动测试的电火花切割机床造型设计研究

张玲玉^{1,2}, 伍健¹

(1.四川轻化工大学, 宜宾 644000; 2.过程装备与控制工程四川省高校重点实验室, 宜宾 644000)

摘要: **目的** 探索一种融入用户体验的电火花切割机床的造型设计的方法, 使用户对电火花切割机床形象有更好的感知体验。**方法** 采用感性需求分析和眼动测试实验相结合的方法, 发掘用户对电火花切割机床造型设计要素的感性需求, 确定机床造型设计重点要素及感性需求意向, 以需求目标为导向设计造型方案, 通过眼动实验对设计结果进行验证评价。**结论** 结合眼动测试获取的用户眼动数据进行分析, 可以比较科学地预测用户对电火花切割机床造型设计的感性需求意向, 有效提升设计方案的科学性、设计效果的用户满意度, 以带来更好的感知体验。

关键词: 眼动测试; 感性需求; 电火花切割机床; 造型设计

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)18-0040-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.18.006

Modeling Design of Wire-cut EDM Machine Based on Eye Movement Testing

ZHANG Ling-yu^{1,2}, WU Jian¹

(1.Sichuan University of Science & Engineering, Yibin 644000, China;

2.Key Laboratory of Process Equipment and Control Engineering in Sichuan Universities, Yibin 644000, China)

ABSTRACT: The paper aims to explore a method of integrating user experience into the design of wire-cut EDM machine, so that users have a better sensory experience of the image of wire-cut EDM machine. The method of perceptual demand analysis and eye movement test experiment were combined to explore the perceptual demand of users on design of wire-cut EDM machine, and determine the key elements and perceptual demand intention of machine tool design. The design scheme was designed with the demand objective and the design results were verified and evaluated by eye movement experiment again. Combined with the analysis of eye movement data obtained from eye movement test, the user's perceptual demand intention for modeling design of wire-cut EDM machine can be more scientifically predicted, which can effectively enhance the scientific rationality of the design scheme and the user satisfaction of the design effect, and bring better sensory experience.

KEY WORDS: eye movement testing; perceptual demand; wire-cut EDM machine; modeling design

电火花线切割是精密金属零件加工的重要手段之一^[1], 主要运用在航空航天、3C 产品、汽车模具等需要高精密零件加工的产业中, 随着技术的发展, 电火花切割机床的市场需求量逐年增大, 相应的设计研究也逐渐增多, 但研究内容大部分集中在技术领域。如丁成才等人^[2]对电火花切割机床的电极丝恒张力装置性能进行了研究, 彭世康等人^[3]对电火花切割

机床的电气系统与工艺进行了研究。电火花切割机床作为大型耐用的工业装备, 广泛用于各种加工生产环节。单调、乏味、缺乏人性化设计的产品形象, 会严重影响操作人员的情绪感受^[4], 因此, 探索一种融入用户体验的电火花切割机床的造型设计方法极为重要。目前, 有学者对相关工业装备造型设计进行了研究, 如周睿^[5]利用眼动追踪对砌块机的代系开发进行

收稿日期: 2019-07-01

基金项目: 过程装备与控制工程四川省高校重点实验室开放基金项目 (GK201803)

作者简介: 张玲玉 (1971—), 女, 四川人, 硕士, 四川轻化工大学教授, 主要研究方向为用户体验与产品创新设计。

通信作者: 伍健 (1995—), 男, 四川人, 四川轻化工大学硕士生, 主攻用户体验与产品创新设计。

了相应研究。吴志军等人^[6]从用户导向入手,对数控机床的设计过程进行了研究,提出了基于用户行为导向的数控机床设计过程研究方法。周红宇等人^[7]将德尔菲专家法与模糊矩阵法相结合,对瓦楞纸印刷机造型设计的设计方案进行了评价,构建出了大型机床的评价模型。钟奇等人^[8]提出了基于眼动数据的拖拉机造型评价方法。众多学者基于工业装备造型提出了许多的研究方法,有的研究设计过程中的多种要素,有的从设计结果出发,对整个设计进行了评价。本文以电火花切割机床为例,从感性需求的研究入手,借助眼动追踪技术进行用户体验测试,以感性需求意向梳理和眼动测试数据结果分析为依托,对电火花切割机床造型设计进行研究。

1 眼动测试实验方案

根据心理学研究,人类所有的认知和知觉都是评价性的,当看待某一对象时,会在好、坏、积极、消极维度上对其进行判断^[9]。视觉是人类从外界获取信息的主要来源,80%的信息来自视觉^[10]。眼动追踪技术是一种通过客观记录和分析被试者眼球运动来探寻人体心理活动的有效手段之一^[11]。眼动轨迹能够非常清晰地记录参与者的眼动行为,该指标是研究人们

客观思考过程的重要指标^[12]。本测试采用的仪器是德国 SMI 公司的眼镜式眼动仪。该公司眼动仪研发技术水平处于全球的领先地位,在技术层面上能够为实验的科学、合理及可靠性带来保障。

1.1 实验准备

眼动测试实验在专业的用户体验实验室进行,使用 SMI 眼镜式眼动仪,对被试者进行测试。前期的准备工作包括:收集 100 张电火花切割机床素材图片,通过分类筛选获得十个样本,对其进行去色处理,调整大小和背景,编号为样本 1~10,见图 1;查阅专业资料,收集到 200 个机床造型设计风格特征感性词汇,用问卷调研与访谈结合的方式,选出十个(五对)感性需求词汇,即大气现代—拘谨传统、科技精密—落后粗劣、安全稳定—危险冲突、整体紧凑—分离松散、创新美观—平淡丑陋;将十个样本缩小排列于同一画面内,无序排列,共组成十一组,其中一组作为对照组,另外十组作为测试组,每个测试组均有一个感性词汇作为关键词,如图 1;招募二十名被试者,涵盖设计专业与非设计专业本科学生,硕士研究生和教师;控制测试场地噪音强度,使之达到测试环境的静音要求;进行预测试,便于优化测试流程。

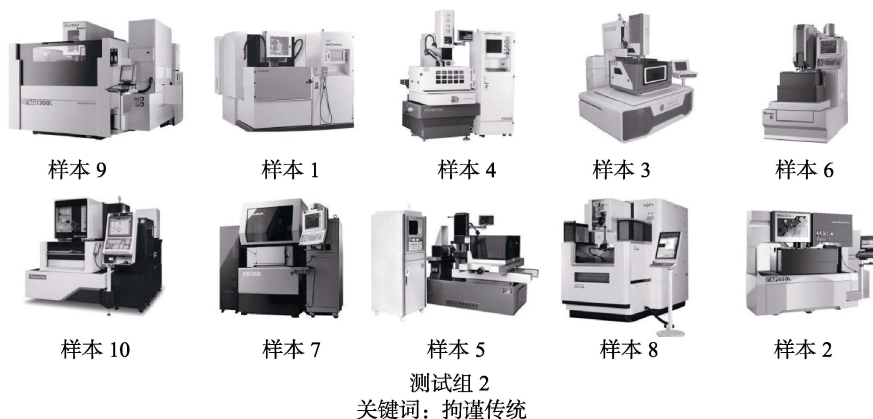


图 1 测试组
Fig.1 Test set

1.2 实验方案

电火花切割机床存在分体式 and 一体化、功能部件封装和裸露等不同的造型结构,用户在观察时的感知体验也会不同。在自由观察阶段,分析被试者眼动数据,根据注视点数量和眼动热区分布,可以确定机床造型中最受关注的重要部位。在以感性词汇为关键词选择样本测试时,用户对机床造型进行有目的性的观察,分析其眼动数据,注视时间能反映出用户最感兴趣的样本区域。将各感性词汇对应的样本选出,逐一提取各个样本中重要部位的造型特点,从而深入分析用户正面感性需求意向的造型特征,据此进行造型方案设计。将设计结果再次进行眼动测试,对眼动数

据进行分析,分析设计效果与用户正面感性需求意向的达成度,验证设计方法的科学性。

实验采用眼动测试与感性需求词汇引导筛选相结合的方法。以感性需求词汇作为自变量,电火花切割机床样本图片作为因变量。实验分为三个阶段进行,第一阶段由被试者自由观察对照组,收集被试者在自由观察时的眼动数据。第二阶段,被试者根据测试组的关键词选择相对应的样本编号,由工作人员进行记录,同时收集被试者在选择过程中的眼动数据,将数据分析的结果与工作人员的记录相结合,提取机床的感性需求要素。第三阶段,由被试者自由观察设计效果图,收集被试者的眼动数据,分析和验证被试

者对设计效果的感受。

2 眼动数据分析及造型设计要素特征提取

第一阶段的测试后获得被试者自由观察对照组的眼动数据,得到视线扫描路径图、焦点图和热区图。将二十位被试者的热区图进行叠加,以样本 2 为例,形成以下热区叠加图,见图 2。热区图中,以红黄绿蓝渐变来表示注视时长。红色越深代表注视时间越长,反之,蓝色越浅则代表注视时间越短。

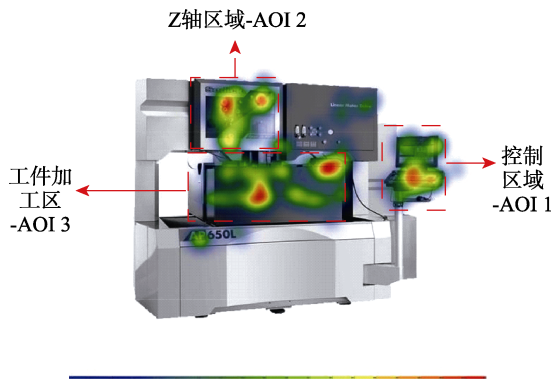


图 2 热区叠加
Fig.2 Hot zone superposition

2.1 电火花切割机床造型设计重要部位提取

根据样本 2 的热区情况进行分析,被试者在观察样本时注意力主要集中在机床的操控区域,Z 轴区域与工件加工区这三个部分,分别分析另外九个样本的热区叠加图,出现与样本 2 相同的情况。为了定量分析电火花切割机床各个部位的受关注情况,将上述的三个部位分成兴趣区(AOI)进行研究,分别是:操控区域—AOI 1、Z 轴区域—AOI 2 和工件加工区—AOI 3。通过分析各个兴趣区的注视点数量,得到被用户关注的这三个区域是电火花切割机床造型设计的重要部位和区域。对于电火花切割机床而言,这三个区域正是完成加工作业的主要功能区域,Z 轴区域包含穿丝机构及垂直导轨,加工区域包含 X-Y 向导轨、卷丝机构、工件夹具及电解液喷射部件等。进一步分析各兴趣区注视的次数发现,AOI 3 区域的注视点数量最多,即工件加工区是造型设计最重要的部位,被试者特别重视,在设计中应特别关注。同时,另外两个兴趣区的注视点数量差距较小,在实际观察中,受关注的程度相差较小,因此将 AOI 1—操控区域,AOI 2—Z 轴共同作为机床造型设计的次要重点部位。重点区域样本注视点数量统计见表 1。

表 1 重点区域样本注视点数量统计
Tab.1 Statistical table of fixation points in key region samples

用户	样本 1			样本 3			样本 5			样本 7			样本 9		
	AOI 1	AOI 2	AOI 3	AOI 1	AOI 2	AOI 3	AOI 1	AOI 2	AOI 3	AOI 1	AOI 2	AOI 3	AOI 1	AOI 2	AOI 3
用户 1	15	9	26	21	16	32	22	16	33	6	12	17	23	19	28
用户 2	25	9	11	32	15	36	13	15	32	19	14	16	31	22	26
用户 3	14	12	16	9	21	21	25	13	26	21	15	17	18	16	31
用户 4	14	11	16	16	7	12	16	21	45	26	15	29	19	25	12
用户 5	17	21	18	24	18	26	16	19	26	8	17	32	17	9	35
用户 6	19	21	9	21	18	22	19	31	28	19	21	25	21	18	25
用户 7	35	16	33	16	23	17	21	14	26	41	31	26	21	17	17
用户 8	18	16	19	16	26	19	19	27	36	21	16	25	10	21	19
用户 9	23	12	31	19	6	31	21	12	11	15	28	17	13	21	18
用户 10	17	15	31	19	31	27	18	39	17	21	16	19	21	16	19
用户 11	18	21	15	19	21	26	15	12	36	17	25	38	31	18	25
用户 12	31	12	12	15	26	17	18	31	32	18	25	21	18	21	19
用户 13	16	21	31	8	23	16	7	26	15	22	27	18	21	25	18
用户 14	8	43	43	15	21	45	13	15	21	19	36	21	25	29	18
用户 15	18	31	24	31	25	26	14	22	19	17	19	31	26	19	27
用户 16	21	9	47	33	21	34	25	19	18	26	18	33	18	16	21
用户 17	18	25	16	16	12	32	26	24	33	11	11	22	16	21	25
用户 18	31	23	17	35	38	21	25	28	27	17	21	31	13	22	19
用户 19	26	9	11	16	21	25	15	19	28	26	31	19	25	32	26
用户 20	19	21	29	11	4	42	23	16	18	22	11	26	21	15	19
总和	403	357	455	392	393	527	371	419	527	392	409	483	408	402	447
平均值	20	18	23	20	20	26	19	21	26	20	20	24	20	20	22

2.2 感性需求特征提取

在第二阶段的测试中，被试者以匹配感性词汇为原则，在无序排列的样本中选出各个词汇所对应的样本编号。在测试阶段，为获取各样本的眼动注视时长，在测试样本组中设置兴趣区用以收集数据，见图 3。

在以某一感性词汇作为筛选目标的情况下，兴趣

区域的视线停留时间越长，则证明被试者对该兴趣区域所代表的样本越感兴趣。再与工作人员在被试者测试时告知的样本号数对照，两者结果相同，则表示可以利用兴趣区的注视时长来分析被试者的选择。以测试组 2，取关键词“传统拘谨”为例，其各个兴趣区域注视时长统计，见表 2。进一步提取其中的平均值，

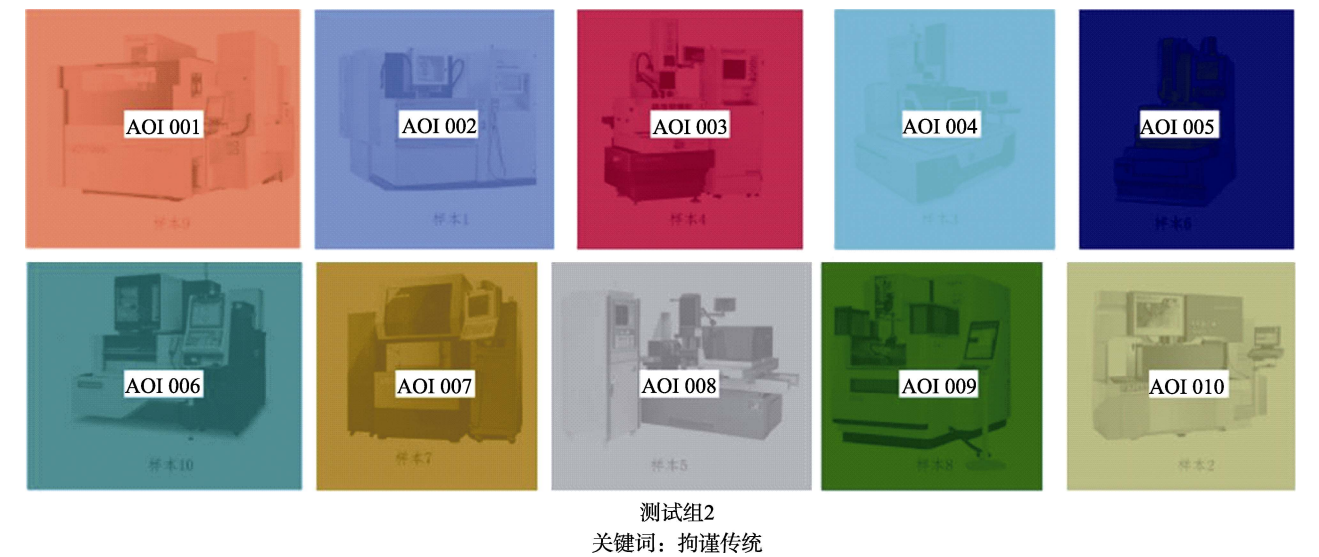


图 3 测试组兴趣区划分

Fig.3 Division of test set interest region

表 2 测试组 2 样本注视时长统计

Tab.2 Statistical table of fixation duration of test set 2

/ms

被试者	样本 1	样本 2	样本 3	样本 4	样本 5	样本 6	样本 7	样本 8	样本 9	样本 10
被试者 1	2845	819	1531	869	2831	1522	2436	796	1018	861
被试者 2	339	1895	1457	1969	996	1589	1581	662	190	1208
被试者 3	1341	588	1746	2822	1824	853	1349	870	737	1793
被试者 4	1925	2309	3460	3451	3443	2895	1465	1093	2756	1664
被试者 5	782	264	811	4676	2896	737	265	682	497	1044
被试者 6	1409	480	447	2831	2288	753	538	704	240	610
被试者 7	547	362	819	579	1357	1009	662	886	596	505
被试者 8	339	372	1373	1514	4817	1340	521	232	1407	264
被试者 9	254	2698	1374	1515	4817	1341	521	364	1953	265
被试者 10	451	853	2411	1023	1946	964	986	321	632	951
被试者 11	946	1095	795	1286	2542	359	856	643	1059	962
被试者 12	685	694	2627	971	2594	1732	1125	746	846	953
被试者 13	894	1436	1894	2140	1893	652	2049	976	475	2954
被试者 14	652	654	1459	879	2179	571	1368	1033	498	1649
被试者 15	1769	634	1254	956	2319	835	632	732	1359	550
被试者 16	853	785	1185	759	2461	528	1038	685	1652	713
被试者 17	645	469	1763	2146	1967	406	979	846	1495	683
被试者 18	2886	1068	2154	1424	1568	869	1684	694	1694	658
被试者 19	1734	892	1694	2549	2106	985	1759	1359	954	1684
被试者 20	769	956	1954	2792	954	653	1567	1843	1463	894
平均值	1103	966	1610	1858	2390	1030	1169	808	1076	1043

绘制柱状统计图，见图 4。数据显示，样本 5 均值最大，因此在关键词“传统拘谨”作为感性需求词汇的选择中，样本 5 最受关注，与被试者在测试阶段告知工作人员的情况一致。利用同样的方法将剩余的九组感性需求词汇测试组数据与被试者的现场数据进行对比发现，结果基本一致。由此可以判定，在以感性需求词汇为关键词的测试组中，兴趣区域的视线停留时间与被试者的兴趣相关联。通过分析被试者的视线停留时间，得出被试者感兴趣的区域。十组感性词汇对应的机床样本分别为：大气现代一样本 9，拘谨传统一样本 4，科技精密一样本 1，落后粗劣一样本 5，安全稳定一样本 6，危险冲突一样本 5，整体紧凑一样本 3，分离松散一样本 5，创新美观一样本 7，平淡丑陋一样本 10。

2.3 感性需求特征分析

根据前两个阶段的测试，得出用户在自由观察电火花切割机床时最关注的造型特征，以及用户根据感性词汇筛选的样本。将两个测试的结果联合分析，提

取被选中样本的重要造型特征。将正面和负面的感性需求词汇所对应的样本造型特征进行对比，得到感性词汇对应的造型特征对比，见表 3。在设计时，相应部位的造型要素应用及风格特征，应向正面的感性需求词汇靠拢，规避负面的感性词汇所对应的造型特征。

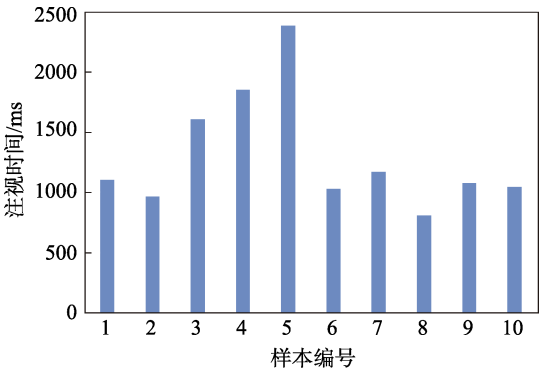


图 4 各兴趣区平均注视时间
Fig.4 Average fixation time histogram of the region of interest

表 3 感性词汇对应的造型特征对比
Tab.3 Contrast chart of modeling features corresponding to perceptual vocabulary

感性词汇	操控区域	Z轴区域	工件加工区	操控区域	Z轴区域	工件加工区	感性词汇
大气现代							拘谨传统
科技精密							落后粗劣
安全稳定							危险冲突
整体紧凑							分离松散
创新美观							平淡丑陋

对所提取的造型要素特征进行深入分析。(1) 大气现代——传统拘谨：大气现代对应的样本操控区域中心显示区域大，分区明确，Z轴和加工区域的X-Y轴导轨封装设计，避免活动部件外露，造型风格和机床整体形态呼应、协调。传统拘谨对应的样本控制区域分体，操控区域面板缺乏设计感，Z轴及X-Y轴活动部件裸露在外。(2) 科技精密——落后粗劣：科技精密的样本对Z轴进行特别的封装设计，部分样本通过透明窗展示其内部的精密结构，操控区域及机床其他部位细节设计到位。落后粗劣对应的样本控制柜与机床分体设计，加工区域采用露轨设计，造型风格不协调，控制面板竖直排列，人机关系不太合理。(3) 安全稳定——危险冲突：安全稳定的样本对Z轴的功能部件进行全封装或者半封装设计，工件加工区域设置较高的隔离围栏，避免加工区域功能部件凌乱呈现，同时也能有效遮挡电解液飞溅及Z轴的加工刀具，达到安全、稳定、干净的效果。危险冲突的样本在设计中采用露轨的方式，在加工过程中，活动部件外露确实存在安全隐患，整体也呈现出危险的视觉感受。(4) 整体紧凑——分离松散：整体紧凑的样本将控制柜和机床进行一体化设计，操控区域、Z轴和加工区域造型风格协调统一。分离松散的样本多为分体设计，各个功能部件设计风格各异，以体现功能为主。(5) 创新美观——平淡丑陋：创新美观的样本主要体现在保证机床整体风格一致的基础上，各部分比例协调，局部细节精心设计。平淡丑陋的样本整体设计风格不统一，造型上缺乏对细节的处理。

3 电火花切割机床造型设计

综合前期研究，用户在认知过程中重点关注机床的加工区域、Z轴及操控区域三个部位，并结合用户整体紧凑、安全等积极感性需求，对机床的导轨、卷丝机构、操控柜等主要功能部件进行封装和一体化设计。机床整体造型采用长方体进行切割和堆叠，底座及床身边缘斜切倒角，线条硬朗有力。加工区域设计透明玻璃隔离围栏，Z轴和操控部分造型保持与整体协调统一，并对色彩、材质、装饰要素进行综合优化创新设计，塑造现代大气、科技精密、紧凑稳定的风格，提升机床的整体感、现代感和与环境的协调性，提升产品审美体验和品牌形象，满足用户的正面感性需求体验，最终效果见图5。在人机方面，操控部件位置 and 高度采用可调设计，提供坐姿和站姿两种操控作业方式，提升操作体验的舒适感和愉悦度。操作状态示意图见图6。

利用眼动追踪技术，采用自由观察与任务性观察相结合的方式，可以挖掘用户对电火花切割机床重点关注部位的积极感性需求意向，并有效应用于电火花切割机床的造型设计中。将设计方案最终效果图进行去色处理，进行第三阶段的眼动测试实验，得到眼动的热区图，见图7。在测试结果的热区图中，工件加工区、Z轴和控制面板等重点设计部位，均得到被试者极大的关注，达到了预期的效果。该设计方案有效改善了企业原产品的视觉形象和品质，提升了其市场竞争力。



图5 最终效果

Fig.5 Final effect drawing



图 6 操作状态示意

Fig.6 Schematic diagram of operating state

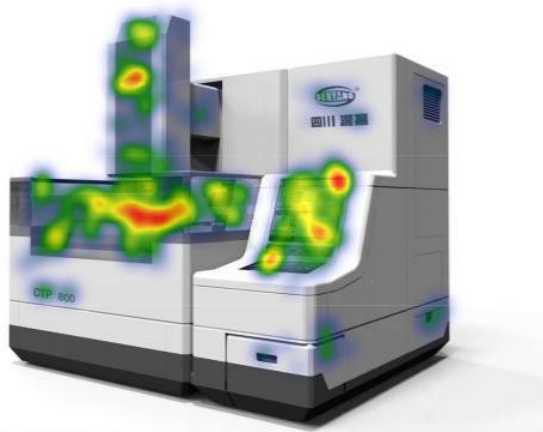


图 7 最终效果热区图

Fig.7 Hot zone of final effect drawing

4 结语

以研究用户的感性需求入手,结合眼动测试的方法,将抽象的感性需求具体量化并作为设计依据,使设计出来的机床造型的用户体验感更好,可以为机床类产品造型设计提供一定的参考。然而,目前设计研究中的眼动实验,理论模型的构建尚存在不足,还需要从视觉—行为、认知—审美等方向作进一步研究。

参考文献:

- [1] 张宝华. 电火花线切割机床技术发展方向探讨[J]. 电加工与模具, 2018(S1): 5-8.
ZHANG Bao-hua. Research on the Technology Devel-

opment Direction of Wire-cut EDM Machine[J]. Electromachining & Mould, 2018(S1): 5-8.

- [2] 丁成才, 黄晓华, 邱明波, 等. 往复走丝电火花线切割机床电极丝恒张力装置性能研究[J]. 电加工与模具, 2018(1): 20-24.
DING Cheng-cai, HUANG Xiao-hua, QIU Ming-bo, et al. Research of the Performance of Constant Tension Control Appliance of Wire Electrode of Reciprocating Traveling Type Wire Electrical-discharge Machine[J]. Electromachining & Mould, 2018(1): 20-24.
- [3] 彭世康, 杜轩宇, 刘桂贤, 等. 双槽电火花线切割机床电气系统研制及工艺研究[J]. 中国科技论文, 2017, 12(22): 2585-2590.
PENG Shi-kang, DU Xuan-yu, LIU Gui-xian, et al. Development and Research on the Electrical System of the Double Groove WEDM Machine Tool[J]. China Sciencepaper, 2017, 12(22): 2585-2590.
- [4] 李东进, 李研, 武瑞娟. 产品设计领域的消费者审美体验[J]. 心理科学展, 2013(2): 336-346.
LI Dong-jin, LI Yan, WU Rui-juan. Consumer Aesthetic Experience in Product Design[J]. Advances in Psychological Science, 2013(2): 336-346.
- [5] 周睿. 基于产品代系开发的砌块机造型设计研究[J]. 机械设计, 2016, 33(6): 115-119.
ZHOU Rui. Modeling Design of Brickwork Machine Based on Product Generations and Series Development [J]. Journal of Machine Design, 2016, 33(6): 115-119.
- [6] 吴志军, 张映琪, 唐超. 用户行为导向的数控装备造型设计过程模型[J]. 机械设计, 2017, 34(7): 105-109.
WU Zhi-jun, ZHANG Ying-qi, TANG Chao. User Behavior Oriented CNC Modeling Design Process Model[J]. Journal of Machine Design, 2017, 34(7): 105-109.

- [7] 周红宇, 戚得众, 韩晓东. 瓦楞纸印刷机造型设计评价研究[J]. 机械设计, 2017, 34(7): 119-123.
ZHOU Hong-yu, QI De-zhong, HAN Xiao-dong. Modeling Design Evaluation of Corrugated Printing Press[J]. Journal of Machine Design, 2017, 34(7): 119-123.
- [8] 钟奇, 裴学胜, 郭钢, 等. 基于多项眼动数据的拖拉机造型设计评选模型[J]. 包装工程, 2018, 39(8): 166-169.
ZHONG Qi, PEI Xue-sheng, GUO Gang, et al. The Selection Model of Tractor Appearance Design Based on Multiple Eye Movement Data[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(8): 166-169.
- [9] 李浩. 新产品非结构化需求转换、概念测试与初始配置方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
LI Hao. Research on Methods on Unstructured Requirement Conversion, Concept Test and Initial Configuration[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [10] 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): 1449-1458.
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): 1449-1458.
- [11] TSAIWC, ROLW, LEECF. Study on the Usability of Various Button Sizes and Visual Feedbacks in Small Touch-Screens[J]. Journal of Ergonomic Study, 2014, 12(1): 56-67.
- [12] 卢国英, 侯冠华. 产品造型设计决策过程中的眼动机研究[J]. 包装工程, 2018, 39(14): 215-220.
LU Guo-ying, HOU Guan-hua. Eye Tracking of Product Design Decision Making Strategy[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(14): 215-220.
-
- (上接第34页)
- [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.
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, 30(2): 40-43.
- [14] 苏建宁, 邱凯, 张书涛, 等. 基于眼动数据的产品造型设计要素评价方法研究[J]. 机械设计, 2017, 34(10): 124-128.
SU Jian-ning, QIU Kai, ZHANG Shu-tao, et al. Evaluation Method Study of Product Modeling Design Elements Based on Eye Movement Data[J]. Journal of Machine Design, 2017, 34(10): 124-128.
- [15] 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.
- [16] 卢兆麟, 汤文成, 薛澄蛟. 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.
- [17] 卢兆麟. 面向工业设计的产品设计 DNA 关键技术与应用方法研究[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2012.
LU Zhao-lin. Study on Key Technology and Application Methods of Design DNA in Industrial Design[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2012.
- [18] 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.