

基于KE与EEG的壁挂式充电桩造型创新设计与评价

尹鑫*, 林丽#

贵州大学机械工程学院, 贵州 贵阳
Email: idyinxin@163.com, #linlisongbai@163.com

收稿日期: 2021年3月5日; 录用日期: 2021年4月1日; 发布日期: 2021年4月8日

摘要

为使壁挂式充电桩设计更符合用户的感性需求, 完善壁挂式充电桩的设计方法, 运用感性工学结合脑电技术指导壁挂式充电桩造型设计。首先, 基于感性工学理论收集筛选感性意象词汇及壁挂式充电桩图片, 提取关键造型元素, 采用正交试验法重组实验样本; 然后, 进行意象评价与脑电实验, 通过主观评价与客观脑电数据同步验证, 获取壁挂式充电桩造型要素与用户感性需求的数量化关系, 分析出用户偏好的壁挂式充电桩机身造型设计要素; 最后, 进行壁挂式充电桩感性创新设计, 联合主客观情感测量手段进行感性评价。通过运用感性工学与脑电技术, 有效地为壁挂式充电桩提供更客观的设计及评价方法, 为同类型产品创新设计提供参考。

关键词

感性工学, 脑电, 产品设计, 壁挂式充电桩, 感性意象

Innovative Design and Evaluation of Wall Mounted Charging Pile Based on KE and EEG

Xin Yin*, Li Lin#

School of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang Guizhou
Email: idyinxin@163.com, #linlisongbai@163.com

Received: Mar. 5th, 2021; accepted: Apr. 1st, 2021; published: Apr. 8th, 2021

Abstract

In order to make the design of wall mounted charged posts more suitable to the users' perceptual

*第一作者。

#通讯作者。

needs, and to refine the design method of wall mounted charged posts, this article used Kansei Engineering (KE) combined with electroencephalogram (EEG) technology to guide the modeling design of wall mounted charged pile. First, based on KE theory to collect the picture of screening perceptual image vocabulary and wall mounted charged pile, extracting key modeling elements and reorganizing experimental samples by orthogonal test method. Then, image evaluation and EEG experiments were conducted, which were confirmed by synchronization between subjective evaluation and objective EEG data, obtaining the quantitative relationship between modeling elements of wall mounted charged pile and users' perceptual demands, and analyzing the user preferred wall mounted charged pile body modeling design elements. Finally, innovative design of wall mounted charged pile susceptibility is conducted and jointly evaluated through host guest emotion measurement. By applying KE and EEG technology, it effectively provides a more objective design and evaluation method for wall mounted charged posts, and provides a reference for innovative design of the same type of products.

Keywords

Kansei Engineering, Electroencephalogram, Modeling Design, Wall Mounted Charging Pile, Perceptual Image

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着石油资源日趋枯竭、环境污染日趋严重, 新能源汽车数量与日俱增, 汽车充电桩行业已不断兴起[1]。用户对充电桩的情感需求及审美体验也在逐步提升, 使充电桩设计满足用户情感需求成为提升产品商业竞争力的关键[2]。而目前对家用型的壁挂式充电桩的情感化设计研究较少, 通过感性工学相关理论, 可以对壁挂式充电桩的造型美度、人性化有一定程度的提高, 提升用户满意度。目前情感化设计多采用主观测量情感的方法, 容易受用户的主观情绪影响, 而生理信号测量可以比较客观真实的反馈用户的情感状态[3]。因此本文引入脑电技术, 结合以情感量化为基础的感性工学理论, 使难以量化的感性认知内容通过数据的形式与产品设计的造型要素相结合, 进行壁挂式充电桩造型创新设计, 结果表明创新设计方案符合用户的感性需求, 为同类产品设计提供了新的参考。

2. KE 理论与 EEG 技术

2.1. KE 理论及应用

感性工学(Kansei Engineering, KE)是一种利用工程技术将用户的感性需求进行量化, 以辅助产品创新设计的理论及方法, 有助于缩短设计师与用户之间的认知差距, 在产品造型设计中广泛应用[4]。石元伍等[5]使用 SET 与感性工学相结合的方法, 提取无人机感性造型特征, 进行无人机造型优化设计; 李晓杰等[6]运用感性工学结合 INPD 方法研究辅助陪伴机器人与意象的关系; Shenhui-cun 等[7]基于感性工学理论, 将联想式创造性思维过程与模糊感性工程相结合, 探索出符合未来顾客需求的新产品形态, 使用户满意度提高了 11.7%。感性工学为产品创新设计提供了科学的理论指导方法, 指导设计师的设计活动。

2.2. EEG 技术及应用

脑电图(electroencephalogram, EEG)是一种使用电生理信号记录大脑活动的方法, 可以直接反应大脑

中的信息加工过程,有效的推测用户的情感状态与认知特征[8]。目前在产品设计领域,国内外学者主要通过脑电进行意象认知及情感测量研究。郭伏等[9]通过眼动与脑电指标研究了用户交互情感;杨程等[10]通脑电实验,构建了产品意象与脑电数据的关系模型;邓丽等[11]使用脑电技术研究了用户情感特征,进行了文创产品创新设计;Kumar等[12]通过将脑电反应与产品评论情绪分析融合来预测顾客满意度。脑电技术从客观的生理层面测量用户认知状态,为产品设计提供了新的思路。而将感性工学与脑电技术结合进行产品创新设计,从客观的、多维的用户认知数据出发进行设计活动,可更好的满足用户需求并改善用户体验。

3. 联合 KE 和 EEG 的壁挂式充电桩造型意象认知

在壁挂式充电桩造型创新设计与评价研究中,基于感性工学方法获取感性意象与产品造型要素的量化关系,再结合基于 EEG 的意象认知,获得用户情感偏好的造型设计要素,再将其应用于具体的产品设计实践中,以主观评价联合脑电测试进行产品意象评价,缩减产品造型设计与用户感性评价之间的差距。

3.1. 确定感性意象词汇

通过调研大量的文献资料及产品评价,获取丰富的感性意象语义词。将初步收集的 100 组形容词对使用统计分析软件 SPSS 进行聚类分析、层次分析后,获取 3 组感性意象词对,分别是:独特的 - 大众的、轻便的 - 笨重的、前卫的 - 复古的。

3.2. 产品造型特征提取及样本重构

从相关文献及网站内收集到 60 张不同造型的壁挂式充电桩样本图片,对收集到的样本图片进行聚类分析及形态分析,分解出关键机身造型要素,确定造型设计要素的关键类目,如表 1 所示。

Table 1. Modeling design elements of wall mounted charging pile

表 1. 壁挂式充电桩造型设计要素

要素	类目			
正面轮廓 X1	X11 矩形	X12 多边形	X13 曲线形	X14 不规则形
分割线 X2	X21 直线	X22 曲线	X23 直线加曲线	X24 无
圆角弧度 X3	X31 小弧度	X32 中弧度	X33 大弧度	
侧面轮廓 X4	X41 矩形	X42 三角形	X43 半圆弧形	

将壁挂式充电桩造型要素进行排列组合后有 $4 \times 4 \times 3 \times 3 = 144$ 种方案,样本量过大,为了降低实验复杂度及提高工作效率,特此采用正交实验法进行产品造型设计要素重组,挑选出部分有代表性的样本组合,缩减样本量以简化脑电实验过程。

Table 2. Orthogonal combination of modeling elements

表 2. 造型要素正交组合

编号	设计要素			
	正面轮廓 X1	分割线 X2	圆角弧度 X3	侧面轮廓 X1
1	X14 不规则形	X22 曲线	X33 大弧度	X42 三角形
2	X14 不规则形	X23 直线加曲线	X32 中弧度	X41 矩形
3	X12 多边形	X24 无	X33 大弧度	X41 矩形

Continued

4	X13 曲线形	X22 曲线	X31 小弧度	X41 矩形
5	X12 多边形	X23 直线加曲线	X31 小弧度	X43 半圆弧形
6	X13 曲线形	X24 无	X32 中弧度	X41 矩形
7	X13 曲线形	X23 直线加曲线	X31 小弧度	X42 三角形
8	X11 矩形	X23 直线加曲线	X33 大弧度	X41 矩形
9	X13 曲线形	X21 直线	X33 大弧度	X43 半圆弧形
10	X14 不规则形	X21 直线	X31 小弧度	X41 矩形
11	X12 多边形	X21 直线	X32 中弧度	X42 三角形
12	X11 矩形	X21 直线	X31 小弧度	X41 矩形
13	X11 矩形	X24 无	X31 小弧度	X42 三角形
14	X11 矩形	X22 曲线	X32 中弧度	X43 半圆弧形
15	X14 不规则形	X24 无	X31 小弧度	X43 半圆弧形
16	X12 多边形	X22 曲线	X31 小弧度	X41 矩形

使用 Rhino6.03D 建模软件绘制表 2 的造型要素组合模型, 统一模型尺寸、色彩、材质及展示方向, 最终渲染出 16 组壁挂式充电桩样本图片, 如图 1 所示。



Figure 1. Specimens of reconstituted wall mounted charged piles
图 1. 重构的壁挂式充电桩样本

3.3. 意象语义评价

基于语义差异法(Semantic Differential, SD)在前期的用户调查与访问的基础上建立意象语义评价调查问卷, 被试对重构的壁挂式充电桩样本的 3 个意象维度分别评分。本文采用李克特 7 点量表对 3 组意象词汇进行语差分析, 数值越偏向哪个方向意象词说明该样本更符合该方向意象。

3.4. 脑电实验

实验中, 以词对“独特的 - 大众的”、“轻便的 - 笨重的”、“前卫的 - 复古的”作为感性意象评价的 3 个维度。被试根据实验流程对 16 个充电桩样本图片进行观察及意象匹配判断, 被试选择出现的意象词符合或不符合样本感性意象, 即每一个样本下会随机出现不同的意象词汇, 按照前文得到的意象评价结果, 每个样本与给定的意象词汇会出现这两种状态。采集被试在不同产品造型意象匹配判断下的脑

电实验数据, 进行各指标数据分析, 以此研究脑区语义加工过程, 为充电桩造型意象评价提供客观的生理依据。

3.4.1. 实验材料

脑电实验中, 实验启动材料为重构的 16 组壁挂式充电桩样本, 使用 Photoshop 对样本图片进行灰度处理, 排除色彩干扰, 同时统一尺寸大小、精度及背景。实验以 3 组感性意象词对为匹配对象, 每张样本图片需在 6 个意象词下各进行 1 次匹配判断, 故每组实验至少进行 $16 \times 6 = 96$ 个 Trial (序列)。

3.4.2. 实验被试

邀请 26 名工业设计系学生作为实验对象, 男女各 13 名, 所有被试身体健康、视力正常、无神经或精神疾病史。要求被试实验前充分休息, 无剧烈体力及脑力劳动, 实验过程中始终精神充沛。实验后给予一定实验报酬。

3.4.3. 实验设备与流程

实验采用无线 32 通道 Emotive EPOC Flex Gel Sensor Kit 脑电系统采集脑电数据, Matlab、SPSS 软件分析脑电数据。实验内容被设计为被试对样本造型与感性意象词汇的匹配判断, 被试选择出现意象词是否符合产品造型意象描述。实验流程如下: 首先, 出现实验指导语指导告知被试实验要求及实验流程; 然后呈现 1000 ms 的“+”引导注意; 接着呈现 5000 ms 的刺激图片; 最后出现意象词进行匹配判断, 判断时间以被试反应时为准。如此反复, 直到所有样本意象匹配完成。实验流程如图 2 所示。

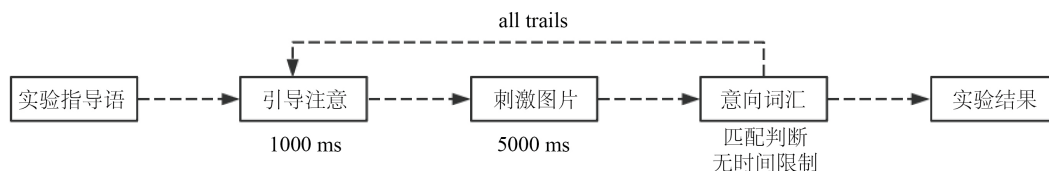


Figure 2. Sample image matching experimental flowchart
图 2. 样本意象匹配实验流程图

4. 数据分析与设计指导

4.1. 主观评价数据分析

共有 66 位被试参与本次意象评价, 其中女性 37 人, 男性 29 人。基于问卷调查, 获取所有被试对 16 个壁挂式充电桩样本的三组感性意象语义差异评价价值。将数据汇总, 计算平均值, 得到每个样本在每组意象词汇下意象均值, 如表 3 所示。

Table 3. Mean value of image evaluation
表 3. 意象评价均值

样本	独特的-大众的	轻便的-笨重的	前卫的-复古的
1	-1.576	0.682	-1.455
2	-1.242	0.621	-0.636
3	-1.015	-0.455	-0.848
4	-1.667	-0.576	-0.985
5	0.288	-0.682	0.727
6	0.606	0.727	0.576

Continued

7	0.394	-0.773	0.379
8	0.864	-0.515	0.424
9	-1.333	1.182	-0.258
10	0.364	0.212	0.364
11	-1.697	-0.485	-1.227
12	-0.242	0.258	-0.242
13	-0.909	0.682	-0.424
14	1.348	1.045	1.045
15	-1.288	-0.379	-0.561
16	0.03	-0.485	-0.227

基于表 2 和表 3 的数据, 根据数量化 I 类理论建立关系模型, 利用 SPSS 进行回归分析, 回归分析可以建立统计分析模型研究各变量间数量变化规律、相关关系并进行模型预测。运用多元线性回归分析, 对各造型设计要素的相关系数及类目得分进行求解, 如表 4 所示。其中, 各类目得分表示该造型设计要素类目对意象评价的影响程度及方向, 范围表示各造型要素对意象评价的贡献度。

Table 4. Results of quantitative analysis

表 4. 数量化分析结果

项目	类目	独特的-大众的		轻便的-笨重的		前卫的-复古的	
		类目得分	范围	类目得分	范围	类目得分	范围
正面轮廓 X1	X11	0.62		-0.017		0.603	
	X12	-0.077	1.442	-0.24	1.192	-0.222	1.087
	X13	0.279		-0.467		0.103	
	X14	-0.822		0.725		-0.484	
分割线 X2	X21	-0.039		0.433		0.039	
	X22	0.37	0.818	-0.078	0.673	0.266	0.583
	X23	-0.448		-0.115		-0.317	
	X24	0.116		-0.24		0.012	
圆角弧度 X3	X31	-0.049		0.139		0.09	
	X32	-0.013	0.127	-0.308	0.447	0.046	0.256
	X33	0.078		0.123		-0.166	
侧面轮廓 X4	X41	0.685		0.223		0.501	
	X42	-1	1.685	-0.218	0.441	-0.763	1.204
	X43	0.087		-0.078		0.096	
常数项		-0.548		0.006		0.096	

4.2. 脑电实验数据分析

4.2.1. 行为数据

由 E-Prime 软件记录被试进行样本意象判断时的反应时时长和选择情况。反应时记录意象词汇出现后, 被试进行匹配判断的时间, 表示被试脑区认知决策时间。通过对比意象评价均值可知, 发现意象与刺激图片匹配程度越高或越低时, 比意象模糊时的反应时更短。各样本在不同意象的匹配判断下平均反应时数据如表 5 所示。

Table 5. Data of subjects' reaction time (s)

表 5. 被试反应时数据(s)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	均值
独特的	1.791	2.713	2.447	2.113	1.802	1.744	2.257	2.292	2.212	2.185	2.164	1.937	2.441	1.741	1.922	2.433	2.137
大众的	1.785	2.397	1.936	2.616	1.881	1.631	2.374	2.720	2.410	3.074	2.068	2.277	2.023	2.353	2.393	2.845	2.299
轻便的	2.438	2.088	2.246	3.072	3.059	2.183	2.727	2.198	2.379	2.119	2.783	2.160	2.261	2.083	2.949	2.630	2.461
笨重的	3.244	2.226	1.769	2.591	2.280	2.424	2.151	3.332	1.914	2.404	2.264	2.227	1.895	2.072	2.236	2.434	2.341
前卫的	1.761	2.330	2.130	2.397	1.705	1.714	2.176	2.644	2.547	2.234	1.872	2.101	1.986	2.006	1.853	2.741	2.137
复古的	1.602	1.867	2.492	2.235	1.938	1.352	3.324	1.967	2.109	1.990	2.528	2.325	2.219	1.976	2.497	2.206	2.164

被试在各样本图片和各意象词汇刺激下的意象匹配选择情况, 能够很好的反应样本的意象属性。在脑电实验之前已经对各样本进行了主观评价, 即每个样本图片有明确的意象值。统计各样本下的词汇选择率, 如表 6 所示, 对比分析可知, 当样本意象越偏向哪个词汇时, 被试对该词汇的选择率就越高。

Table 6. Choice rate of image words

表 6. 意象词汇选择率

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
独特的	0.96	0.77	0.69	0.73	0.38	0.08	0.65	0.46	0.54	0.77	0.96	0.23	0.38	0.19	0.88	0.50
大众的	0.08	0.15	0.38	0.38	0.65	0.88	0.23	0.73	0.62	0.23	0.12	0.73	0.77	0.85	0.15	0.35
轻便的	0.31	0.31	0.23	0.35	0.42	0.15	0.46	0.54	0.50	0.54	0.73	0.27	0.65	0.54	0.58	0.23
笨重的	0.38	0.65	0.69	0.81	0.58	0.69	0.42	0.50	0.38	0.35	0.19	0.69	0.31	0.38	0.23	0.65
前卫的	0.96	0.69	0.46	0.62	0.35	0.12	0.73	0.38	0.50	0.73	0.92	0.08	0.42	0.42	0.88	0.50
复古的	0.00	0.19	0.42	0.31	0.69	0.88	0.31	0.65	0.50	0.15	0.15	0.62	0.73	0.69	0.15	0.31

4.2.2. 脑电数据分析

脑电数据使用 eeglab 插件进行预处理, 只有经过预处理的数据, 才能进行进一步的特征值提取及后续实验数据的统计分析。本文截取意象词刺激出现前 100 ms 到匹配判断后 1000 ms, 共 1100 ms 的脑电信号进行分析。基于脑电数据绘制 32 个电极通道的频谱图, 可知额叶区域脑电信号最强, 如图 3 所示。根据以往研究[13], 大量的语义意象认知加工处理在额叶区进行, 因此选取额区电极(Fz、Fp1、Fp2、F3、F4、F7、F8)通道数据进行后续分析。对所有被试的目标阶段的脑电数据进行叠加, 发现在意象词出现 400 ms 左右时出现了显著的 N400 成分, 如图 4 所示。

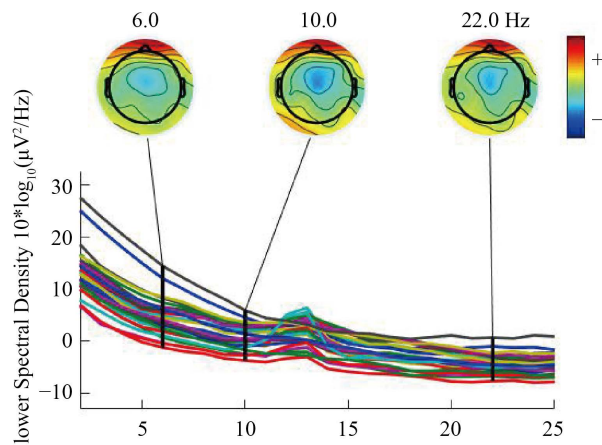


Figure 3. Spectrum of EEG 32 channel
图 3. EEG32 通道频谱图

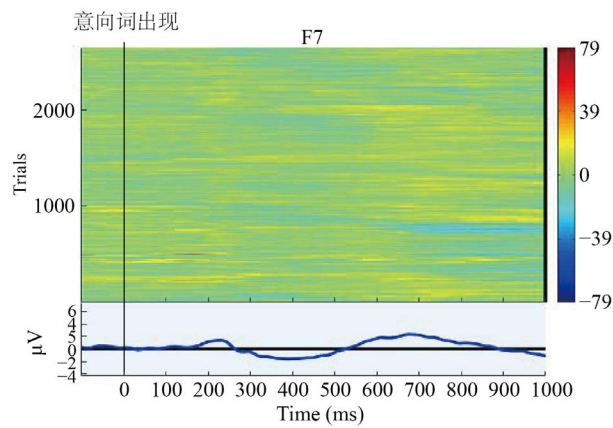


Figure 4. ERP time-frequency plots of the target phase (F7)
图 4. 目标阶段 ERP 时频图(F7)

采用 ERPlab 导出所有被试在意象匹配判断阶段的 N400 平均波幅, 分析被试不同匹配判断时出现的 N400 成分在额叶区的差异, 发现不同匹配判断产生不同的 N400 成分波幅。当样本 - 意象匹配判断为符合时, 被试额叶区出现的 N400 波幅值较小; 当样本 - 意象匹配判断为不符合时, 被试额叶区出现的 N400 波幅值较大, 如图 5 所示。

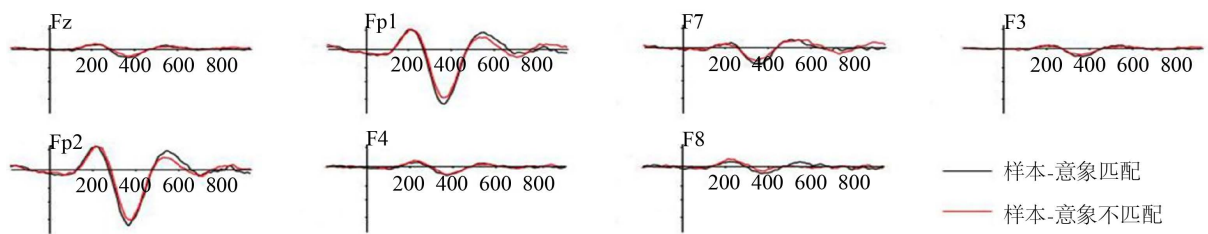


Figure 5. ERPs superimposed waveform maps of electrodes on the forehead
图 5. 前额电极的 ERPs 叠加波形图

使用统计分析软件 SPSS 对额叶区不同判断结果的 N400 波幅值进行配对 T 检验, 如表 7 所示, 结果表明, 意象匹配结果为符合与意象匹配结果为不符合时, 额叶区 N400 波幅值具有显著性差异($P = 0.001$),

$p < 0.05$ 或 0.01), 且匹配判断为符合时 N400 波幅值显著高于不符合情况。

Table 7. The results of paired T test
表 7. 配对 T 检验结果

配对	配对差值					t	自由度	显著性 p
	平均值	标准偏差	标准误差平均值	差值 95%置信区间				
				下限	上限			
符合-不符合	0.475	1.775	0.137	0.205	0.746	3.471	167	0.001

4.2.3. 讨论

从被试反应时长分析, 通过对比主观意象评价可知, 当样本有明确意象时, 即样本与意象完全匹配或不匹配时, 被试反应时较短, 当意象较模糊时, 被试反应时较长。

从被试意象选择率分析, 当样本意象越符合时, 被试对该意象词汇的选择率越接近于 1, 当样本意象越模糊时, 被试对该意象词汇的选择率越接近于 0.5, 当样本意象越不符合时, 被试对该意象词汇的选择率越接近于 0。

从脑电数据 ERP 结果分析, 额叶区出现显著的 N400 成分, 且不同的意象匹配判断结果造成额区 N400 波幅值差异, 样本 - 意象匹配时 N400 成分波幅明显高于样本 - 意象不匹配时。

实验结论与文献[14]研究结论一致。因此, 被试反应时、意象选择率及 N400 成分平均波幅差异可以用于产品意象认知, 帮助设计人员更科学和客观地获取用户偏好信息。

4.3. 设计指导

通过表 4 中的数量化分析结果可知, 正面感性意象词汇(独特的、轻便的、前卫的)与类目得分负相关, 数值越小, 表示该意象越符合样本感性评价, 反正则越不符合。范围值用于衡量每个造型要素在意象评价中的贡献程度, 其结果表明对于壁挂式充电桩意象认知贡献最大的是正面轮廓, 其次是侧面轮廓, 然后是分割线和圆角弧度。结合脑电实验中被试反应时、词汇选择率及额区 N400 成分波幅数据, 发现不规则形、曲线形的机身轮廓, 直线结合曲线形的机身分割线, 圆润的机身倒角以及非平面造型侧面造型会给用户带来独特的、轻便的及前卫的用户偏好的感性意象, 而常规的矩形机身轮廓、直线分割线、锋利的倒角及矩形的侧面造型带来大众的、笨重的和复古的体验。因此在进行壁挂式充电桩造型创新设计时应该抓取目标用户需求, 以数据作为参考, 结合设计师专业知识, 整体把握产品设计。同时, 创新设计方案可通过主客观联合评价的方式, 将用户心理及生理信息融合, 使方案评价数据更加精准及客观。

5. 壁挂式充电桩造型创新设计与评价

根据前面分析得出汽车充电桩造型感性诉求与各种设计要素的关系, 利用相关的结论, 模拟进行一项充电桩造型的设计, 以前卫的 - 复古的为例, 可以设计为 X14 不规则形态的机身轮廓、X23 直线加曲线型的分割线、X33 轮廓倒角弧度为大弧度、及 X42 三角形的机身侧面, 所设计的方案如图 6 所示。

邀请 31 名被试对壁挂式充电桩创新设计方案使用 SD7 点量表进行意象评分, 获得样本在“前卫的一复古的”词对下的感性意象评价。接下来, 按照文中实验范式招募 10 名被试进行脑电实验, 获取被试的行为数据及脑电数据, 验证样本意象是否与主观评价一致。各指标数据如表 8 所示。

创新方案在“前卫的 - 复古的”意象下评价值为-1.774, 说明被试主观认为该方案是较为前卫的。通过脑电实验, 被试反应时均大于前文脑电意象认知实验中反应时均值, 该方案与意象词匹配或不匹配程度较高; 被试对于“前卫的”意象词选择率显著高于“复古的”, 说明该方案是前卫的; 在“前卫的”

意象下 N400 平均波幅小于“复古的”意象出现时, 根据前文的样本-意象匹配判断实验可知, 该创新设计方案符合“前卫的”意象。基于脑电的壁挂式充电桩创新设计方案意象认知实验从客观的生理数据层面证明了方案意象与主观层面一致, 符合用户感性需求。



Figure 6. Innovative design scheme of wall mounted charged posts
图 6. 壁挂式充电桩创新设计方案

Table 8. Evaluation values versus test values
表 8. 评价值与测试值

	评价值	反应时/s	选择率	N400 平均波幅/ μV
前卫的	-1.774	1.352	0.9	-4.226
复古的		1.783	0.1	-2.523

6. 结语

以壁挂式充电桩为研究对象, 运用感性工学理论结合脑电技术的方法, 以获取壁挂式充电桩造型要素与用户感性需求的数量化关系, 分析出用户偏好的壁挂式充电桩机身造型设计要素, 通过脑电同步验证, 设计出更符合消费者情感需求的壁挂式充电桩。通过案例研究, 进一步验证了主客观情感测量联合在产品领域设计的可行性, 同时完善了同类型的产品造型设计方法, 对产品创新设计研究具有一定的参考价值。

基金项目

国家自然科学基金项目(51865003); 黔科合平台人才计划资助项目([2018]5781)。

参考文献

- [1] 唐葆君, 王翔宇, 王彬, 等. 中国新能源汽车行业发展水平分析及展望[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2019, 21(2): 6-11.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 林丽, 郭主恩, 阳明庆. 面向产品感性意象的造型优化设计研究现状及趋势[J]. 包装工程, 2020, 41(2): 65-79.
- [5] 石元伍, 王玮剑. 基于 SET 与 KE 的城市管理无人机设计[J]. 包装工程, 2018, 39(12): 113-118.
- [6] 李晓杰, 梁健. 基于 INPD 与 KE 的老年人辅助陪伴机器人造型设计[J]. 包装工程, 2020, 41(24): 70-78.

-
- [7] Shen, H. and Wang, K. (2016) Affective Product Form Design Using Fuzzy Kansei Engineering and Creativity. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, **7**, 875-888. <https://doi.org/10.1007/s12652-016-0402-3>
- [8] 王雪霜, 郭伏, 刘玮琳, 等. 基于事件相关电位的产品外观情感测量研究[J]. 人类工效学, 2018, 24(1): 20-26.
- [9] 郭伏, 李明明, 胡名彩, 等. 基于眼动和脑电技术的机器人情绪行为对用户交互情感的影响研究[J]. 人类工效学, 2018, 24(2): 1-7.
- [10] 杨程, 陈辰, 唐智川. 基于脑电的产品意象推理模型研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(23): 126-136.
- [11] 邓丽, 陈波, 庞茜月, 等. 脑电技术在文化创意产品情感化设计中的应用[J]. 图学学报, 2018, 39(2): 327-332.
- [12] Kumar, S., Yadava, M. and Roy, P.P. (2019) Fusion of EEG Response and Sentiment Analysis of Products Review to Predict Customer Satisfaction. *Information Fusion*, **52**, 41-52. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2018.11.001>
- [13] 陈默, 王海燕, 薛澄岐, 等. 基于事件相关电位的产品意象-语义匹配评估[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, 44(1): 58-62.
- [14] 李艳, 陈楚玲, 宋武. 产品形态功能示意性 ERP 实验研究——以旋钮造型为例[J]. 南京艺术学院学报(美术与设计), 2020(1): 175-179.