

基于情感与可供性结构矩阵的产品创新设计研究

白仲航^{1,2}, 张嘉辉^{1,2}, 张旭²

(1.河北工业大学 建筑与艺术设计学院, 天津 300132;

2.河北省高等学校人文社会科学重点研究基地, 天津 300132)

摘要: **目的** 旨在弥补可供性结构矩阵在情感内容方面的不足, 进一步明确可供性结构矩阵在产品创新设计中的使用过程。**方法** 用更为客观的熵权法代替可供性结构矩阵原有的赋权方式, 从而实现情感因素的引入, 同时结合鱼骨图和冲突矩阵进行问题的分析求解, 并以扫地机器人的产品创新进行方法论证。**结果** 把已有的可供性结构矩阵工具作为一个主导工具, 提出了将情感-熵值法将情感因素融入可供性结构矩阵中, 形成了完整的产品创新设计流程。**结论** 对扫地机器人的改进设计证明了该方法的实用性和有效性, 丰富完善了可供性结构矩阵方法体系, 对之后的产品设计实践提供了参考。

关键词: 情感化设计; 情感-熵值法; 可供性理论; 可供性结构矩阵; 鱼骨图; 冲突矩阵

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)24-0135-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.24.015

Product Innovation Design Based on Emotion and Affordance Structure Matrix

BAI Zhong-hang^{1,2}, ZHANG Jia-hui^{1,2}, ZHANG Xu²

(1.School of Architecture and Art Design, Hebei University of Technology, Tianjin 300132, China; 2.Key Research Base of Humanities and Social Sciences in Higher Education Institutions of Hebei Province, Tianjin 300132, China)

ABSTRACT: The work aims to make up for the deficiency of affordance structure matrix in emotional contents, to further clarify the use process of the affordance structure matrix in product innovation design. The original weighting method of affordance structure matrix was replaced by a more objective entropy weight method, so as to introduce the emotional factors. At the same time, combined with fishbone diagram and conflict matrix, the problem was analyzed and solved, and the innovation of sweeping robot was used to make a method argument. With the existing affordance structure matrix as a dominant tool, the emotion-entropy method was proposed to integrate emotional factors into the affordance structure matrix, forming a complete product innovation design process. The improved design of sweeping robot proves the practicality and effectiveness of the method, enriches and completes the affordance structure matrix method system, and provides reference for the subsequent product design practice.

KEY WORDS: emotional design; emotion-entropy method; affordance theory; affordance structure matrix; fishbone diagram; conflict matrix

可供性概念诞生于生态心理学领域,是由生态心理学家吉布森提出,将其作为一种描述用户与环境之间互惠关系的理论,原意是指环境为用户提供行动的可能性^[1]。在设计心理学系列书籍中对可供性进行了阐释,从而将可供性的概念引入设计界^[2]。可供性通

过分析不同情境下用户与产品、环境之间的交互关系,提出了三种不同类型的可供性^[3]。依据“物-功能”“物-人”界面将可供性理论分为功能可供性、认知可供性、行为可供性、感官可供性四种要素^[4],并将四种要素引入产品造型设计,优化产品造型内容^[5]。

收稿日期: 2022-07-08

基金项目: 河北省社会科学基金项目(HB21YS041)

作者简介: 白仲航(1978—),男,教授,主要研究方向为创新设计、服务设计、功能设计。

通信作者: 张旭(1984—),女,助理研究员,主要研究方向为社会创新。

情感化设计主要是以用户的使用经验和用户体验为基准进行的产品设计^[6]。可供性理论旨在研究用户心理以及用户与环境之间的关系,所以有必要在其中拓展情感因素方面的内容。现阶段提出利用可供性理论实现更具人性化和情感化的产品设计,如可供性思维辅助情感三层次理论的产品创新方法^[7]。

可供性概念同时被引入工程设计之中,对整个产品生命周期的主要影响因素进行设计^[8]。在研究大量的矩阵工具后创造性提出面向可供性的设计导向工具——可供性结构矩阵(ASM)^[9]。该工具将需求类信息与物理结构进行比较,通过矩阵交互的方式来帮助设计者发现潜在设计问题,但缺乏针对情感因素的考量。

1 可供性结构矩阵

Fadel G M 等利用主观定权法对可供性参数进行定权,形成一个完整的可供性结构矩阵。可供性结构矩阵的构建步骤为:确定可供性,依据+/-AAA、+/-AUA对可供性进行分类,其中+表示积极可供性,-表示消极可供性,AAA表示存在于部件与部件之间的可供

性,AUA表示部件与用户之间的可供性,并利用主观赋权法对可供性参数定权,以比较其相对重要程度;列出结构部件,利用矩阵分析确定可供性和部件之间的交互作用,根据需要使用ASM顶三角形识别结构之间的相互作用;计算行列总和,分析结果从而找到待设计问题,如图1。

Nguyen 等^[10]将遗传算法应用到可供性结构矩阵中以寻求最优化的设计参数,并进行了产品再设计研究;马雪梅等^[11]在研究外部空间设计上应用了可供性结构矩阵,介于可供性极性的特性将其视为一种设计评估工具,存档典型的可供性,并用以引导产品设计实施过程;姜少飞等^[12]提出了一种面向产品概念的设计过程,以及基于“物-场可供性”模型提升产品设计质量的设计方法。

但可供性结构矩阵的应用仍然缺乏情感因素考量以及在赋权方式上主观性太强的问题,无法考虑到用户本身的情感内容。因此,本研究利用情感因素优化现有的可供性结构矩阵,提出了一种基于情感评价的熵值定权法。该方法可以使可供性结构矩阵工具的设计导向更加明确、清晰。

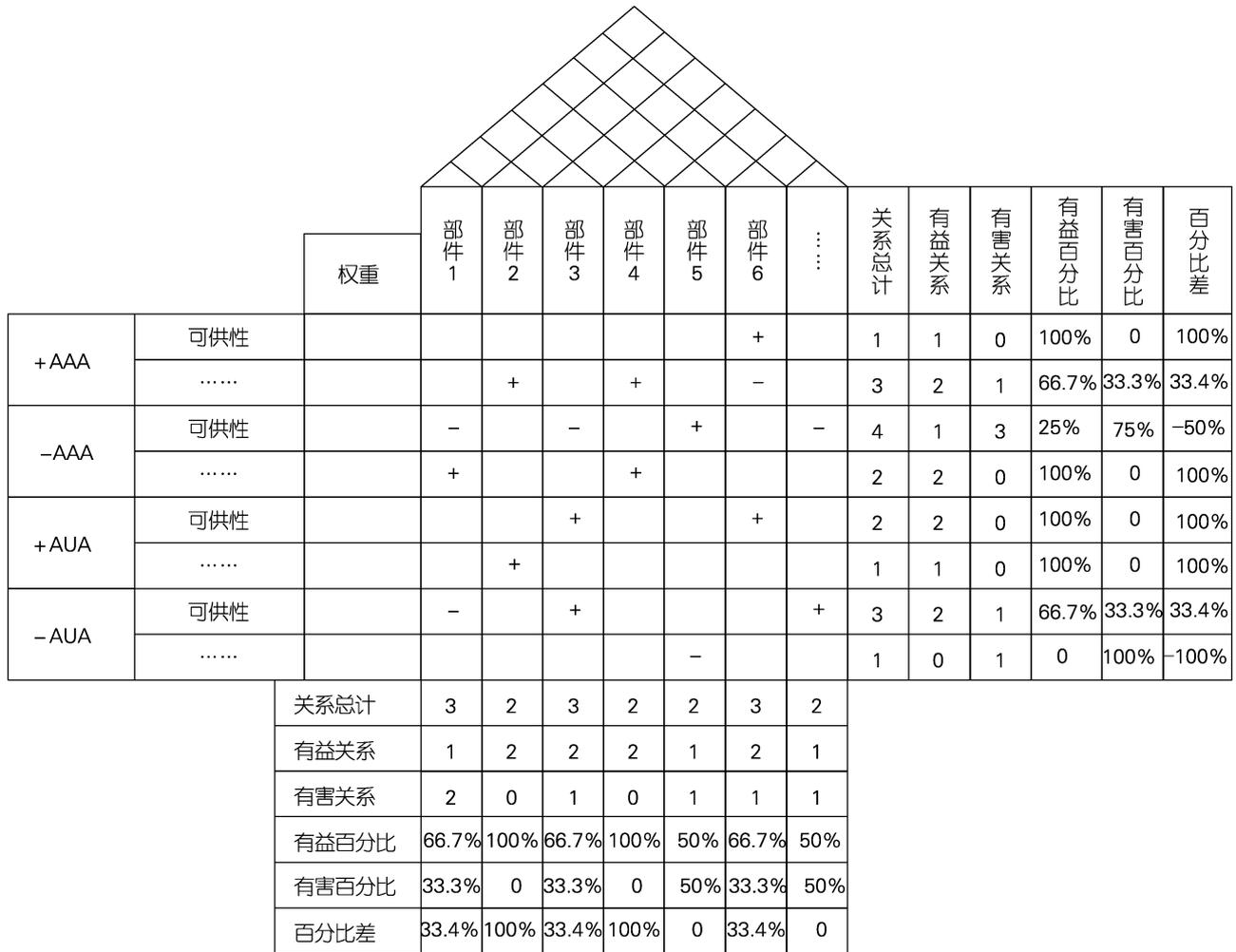


图1 可供性结构矩阵
Fig.1 Affordance structure matrix

2 基于情感-熵值法的可供性结构矩阵

2.1 情感-熵值法

熵值法理论是在产品情感化设计中指标赋权方面应用广泛的一种理论。熵值法在产品设计中多用于对相关参数的评价, 因此受到许多学者们的关注和应用。苏建宁等^[13]提出一种基于信息熵和最小偏差的评价方法来减少认知不确定性对感性意象评价结果的影响; Li^[14]提出了一种基于熵值法和层次分析法的产品开发用户满意度评价方法, 该方法对产品质量评价具有客观性和有效性。为了利用情感因素优化现有的可供性结构矩阵, 考虑将情感因素关联到可供性的定性评估, 提出了一种基于情感评价值的熵值定权法, 利用“熵”可为多项可供性的综合评价参数提供定量的依据。

熵值法计算权重的过程如下, 首先将矩阵 A 规范化得到矩阵 $B=(b_{ij})m \cdot n$; 其次设第 j 项参数的熵值为 c_j :

$$c_j = \sum_{i=1}^m b_{ij} \ln b_{ij}, i=1, 2, 3 \dots m; j=1, 2, 3 \dots n \quad (1)$$

最后通过计算即可得到第 j 项参数的权重 u_j , 利用公式如下:

$$e_j = \frac{1}{c_j}, j=1, 2, 3 \dots n, u_j = e_j / \sum_{j=1}^n e_j, \text{且} \sum_{j=1}^n u_j = 1 \quad (2)$$

通过问卷调查法对可供性结构矩阵中输入的可供性进行情感评价, 并利用李克特量表的分级形式, 通过表 1 赋予可供性用户情感评价值。满意程度能够代表用户对每项可供性的情感反应, 其中不满意对应分值 1, 并以此类推, 满意对应分值为 5。假设存在 m 个被访者对 n 项可供性进行情感评价, 利用获取的 m 个被访者对 n 项可供性的情感评价数值构建可供性情感评价矩阵 $A=(a_{ij})m \cdot n$, a_{ij} 表示第 i 个调查者对第 j 项可供性的评分。利用熵值法处理可供性情感评价矩阵 $A=(a_{ij})m \cdot n$, 计算得到各项可供性与情感反应直接关联的权重值。

表 1 用户情感评价值
Tab.1 Users' emotion evaluation value

满意程度	不满意	虽然不满意但是可以忍受	无所谓	满意但是认为理所应当	满意
评价值	1	2	3	4	5

2.2 基于情感-熵值法的可供性结构矩阵

将可供性结构矩阵与情感-熵值法相结合, 构建了一个基于情感-熵值法的可供性结构矩阵, 如图 2 所示。在这个新的矩阵中, 通过分析用户-产品-环境

		熵值	权重	部件 1	部件 2	部件 3	部件 4	部件 5	部件 6	...	关系总计	有益关系	有害关系	有益百分比	有害百分比	百分比差	
+AAA	可供性								+		1	1	0	100%	0	100%	
	.....				+		+		-		3	2	1	66.7%	33.3%	33.4%
-AAA	可供性			-		-		+		-	4	1	3	25%	75%	-50%	
	.....			+			+				2	2	0	100%	0	100%
+AUA	可供性					+			+		2	2	0	100%	0	100%	
	.....				+						1	1	0	100%	0	100%
-AUA	可供性			-		+				+	3	2	1	66.7%	33.3%	33.4%	
	.....					+		-			1	0	1	0	100%	-100%
+AEA	可供性			+		-					2	1	1	50%	50%	0	
	.....				-		+			+	3	2	1	66.7%	33.3%	33.4%
-AEA	可供性					+		+			2	2	0	100%	0%	100%	
	.....			+			-				2	1	1	50%	50%	0
关系总计				5	3	6	4	3	3	2							
有益关系				3	2	4	3	2	2	1							
有害关系				2	1	2	1	1	1	1							
有益百分比				60%	66.7%	66.7%	75%	66.7%	66.7%	66.7%							
有害百分比				40%	33.3%	33.3%	25%	33.3%	33.3%	33.3%							
百分比差				20%	33.4%	33.4%	50%	33.4%	33.4%	33.4%							

图 2 基于情感-熵值法的可供性结构矩阵

Fig.2 Affordance structure matrix based on emotion-entropy method

之间的关系，将可供性的分类方式扩展为+/-AAA、+/-AUA、+/-AEA^[15]，通过获取用户对各项可供性的情感满意度评分，利用熵值法计算得到权重值，从而构建左侧第一输出——可供性、与情感反应直接关联的权重值；利用产品结构树构建上侧第二输入——部件；中间区域用来构建可供性与部件之间的关联，“+”代表有利关系，“-”代表有害关系，“”代表没有关系，顶三角形用以分析部件之间的相互作用；右侧和下侧区域展示累加的正相关结果、负相关结果、占比、差异性，通过数字反映需要改进的可供性、部件以及改进的迫切程度，负百分比差异越大（可能是存在问题的地方），越应该引起注意。

3 基于情感与可供性结构矩阵的产品创新设计流程

基于上述研究内容，构建了一套基于情感和可供性结构矩阵的产品设计流程，利用该过程最终能够输出产品创新设计结果，基于情感和可供性结构

矩阵的产品设计过程如图3所示。该过程具体分为以下几步：

- 1) 确定目标产品的可供性。通过分析用户-产品-环境之间的交互关系，归纳整理相关的可供性描述并依据+/-AAA， +/-AUA， +/-AEA 进行可供性分类。
- 2) 利用情感-熵值定权法对各项可供性进行定权。通过问卷法对可供性进行情感评价分析，将获取的满意度数值借助熵值法进行计算，得到各项可供性与情感反应直接关联的权重值。
- 3) 确定目标产品的功能部件。根据产品结构树对产品结构进行分解，整理筛选之后，确定与目标产品功能相关的部件。
- 4) 目标产品的可供性结构矩阵建立及分析。将获得的结果输入待建的可供性结构矩阵中，分析可供性与部件之间的关联性，“+”代表部件与可供性之间的关系是有利关系，“-”代表有害关系，“”代表没有关系，并在矩阵中进行表示。累加矩阵中的有利关系和有害关系得到总和，并计算各自比重以及差异性，根据计算结果分析确定要改进的待设计部件。

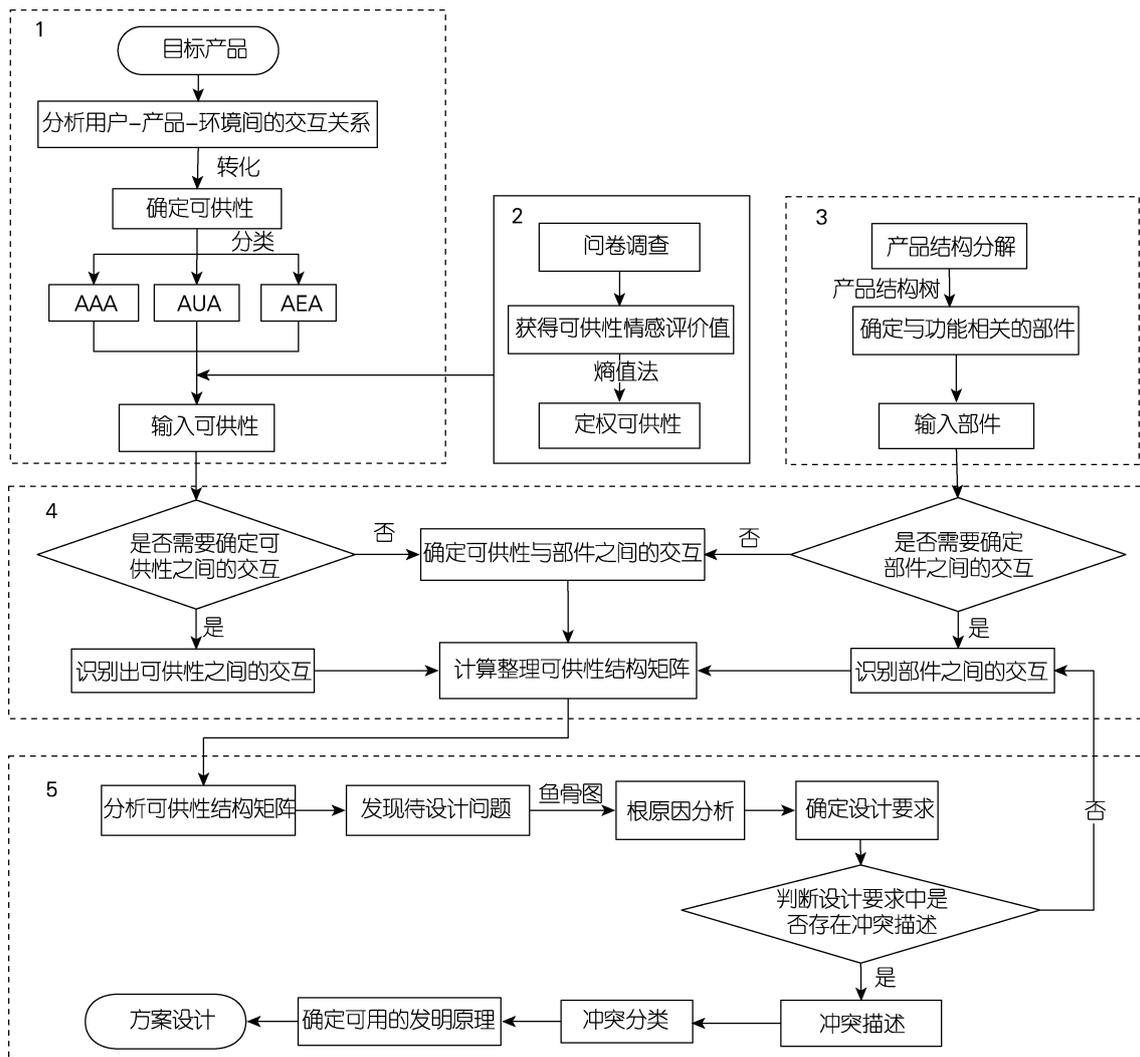


图3 基于情感可供性结构矩阵的产品设计流程
Fig.3 Product design process based on emotional affordance structure matrix

5) 产生产品创新方案。在分析问题、解决问题阶段, 利用鱼骨图分析设计部件进行原因分析, 从而确定待设计部件的设计要求, 对设计要求中存在的冲突描述进行整理分类, 利用 TRIZ 理论中的冲突矩阵检索确定可用的发明原理, 最后根据发明原理进行方案设计。

4 产品设计应用

4.1 案例分析

智能家电产品的普及意味着人们生活水平的提高和用户需求多样性, 市场和用户对高科技产品有了更高的设计要求和期待。智能家电打破了传统家电的使用模式, 用户首次接触智能家电时容易产生陌生感, 不顺畅的产品体验过程会给用户带来消极的心理感受进而产生排斥心理。因此, 针对该类产品设计的过程中, 在满足用户基本的功能需求以外还应充分考虑用户的情感需求内容。

扫地机器人目前已经成为了智能化程度较高的机器人, 它有效地提高了人们的生活水平和工作效率, 越来越被人们在日常生活中所普及和认可。因为其在使用过程中与用户之间存在着大量的交互行为, 有着较多的情感需求, 因此确定利用改良的扫地机器

人对创新设计方法进行验证。从扫地机器人的框架结构来看, 扫地机器人主要是通过自主进行清扫的工作方式来解放用户, 其在工作流程中涉及多个系统、部件的协调合作, 用户、扫地机器人、清扫环境之间存在着大量的交互关系。图 4 为扫地机器人的产品原型和基本的内部结构。

4.2 设计过程

1) 确定扫地机器人的可供性。通过分析用户在家居环境中使用扫地机器人时存在的交互关系, 整理获得九项可供性描述: 启动开关、移动能力、检测垃圾、清洁能力、制造声音、贴合地面、续航能力、规避障碍、附着垃圾, 并按照 +/-AAA, +/-AUA, +/-AEA 进行分类。

2) 利用情感-熵值定权法对扫地机器人各项可供性进行定权。将结果整理得到表 2。

3) 确定扫地机器人的功能部件。根据图 5 扫地机器人的产品结构树对其进行结构分解, 最终确定要输入的与扫地机器人功能相关的部件: 按键/扭、红外感应器、行走电动机、驱动轮、万向轮、外部传感器、线加速器计、陀螺仪、滤尘器、集尘盒、灰度传感器、真空吸尘电动机、风机、边刷、边刷电机。

4) 扫地机器人的可供性结构矩阵建立及分析。

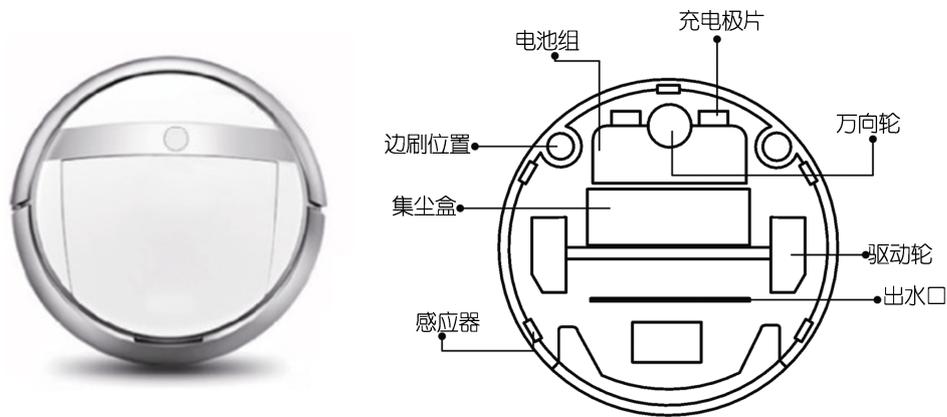


图 4 扫地机器人的产品原型和基本结构图
Fig.4 Prototype and basic structure diagram of sweeping robot

表 2 用户情感评价价值
Tab.2 Users' emotion evaluation value

编号	可供性描述	可供性类别	熵值	权重	评分总和
1	启动开关	+AUA	0.970 2	0.068 3	39
2	移动能力	+AAA	0.939 5	0.138 6	31
3	检测垃圾	+AEA	0.951 7	0.110 6	32
4	清洁能力	+AEA	0.945 4	0.125 2	33
5	制造声音	-AAA	0.944 0	0.128 4	22
6	贴合地面	+AEA	0.966 1	0.077 6	35
7	续航能力	+AEA	0.955 5	0.101 9	38
8	规避障碍	+AEA	0.957 9	0.096 5	14
9	附着垃圾	-AUA	0.933 6	0.152 3	24

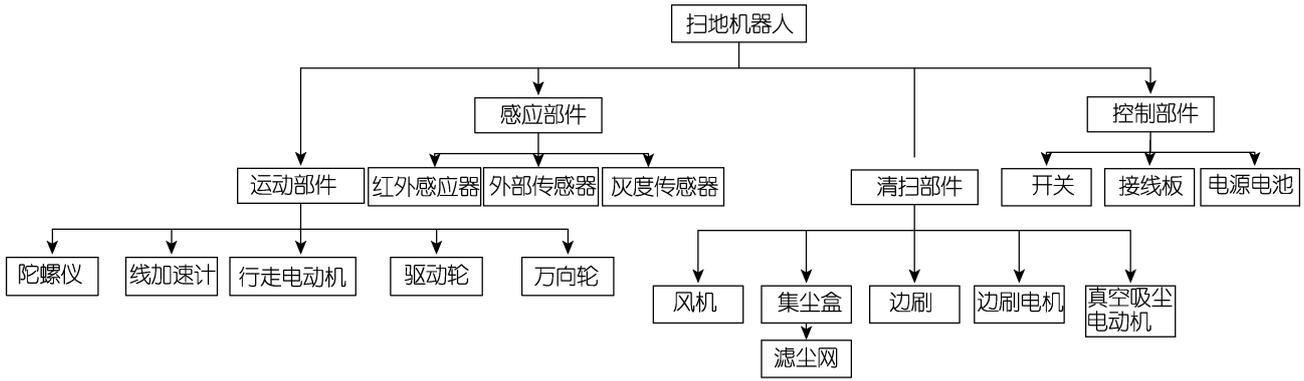


图5 扫地机器人的结构树
Fig.5 Structure tree of sweeping robot

将可供性、权重值、部件输入可供性结构矩阵中，并建立可供性与部件之间的关联性，计算有利、有害关系总和、各自比重以及差异性，其中红色代表有利关系，蓝色代表有害关系，结果如图6所示。

从图6可以得出：左侧可供性的情感权重数值表明，附着垃圾这项可供性权重数值最高，因此其与部件的交互关系最应该引起设计者的注意，且由结构矩阵可得与其呈有害交互关系的仅集尘盒这一部件；通过矩阵下部的数值比较，集尘盒这一部件的有利比重与有害比重差额最大，且与用户关注的可供性交互无有利关系，说明该部件待改进的迫切程度最高；通过矩阵右侧数值的分析比较，制造声音这项可供性的有利比重与有害比重差额最小，有害百分比占比较多，同样也需要关注。综上所述，从元件改进的角度出发，

集尘盒这一部件表现出来的问题最多，且其对应的附着垃圾这一可供性问题所占权重值最高。

5) 产生创新方案。通过可供性结构矩阵的分析，最终决定对集尘盒进行改进。图7为扫地机器人的集尘盒及结构图。

鱼骨图是一种发现问题根本原因的分析方法，因此，采用鱼骨图法来分析集尘盒部件中令用户抵触的根本原因，从而发现相关需求点。根据图8分析得到：用户对集尘盒进行清洗时需要循环清洗集尘盒，灰尘汇集在集尘盒的边角区域且滤网沾有大量灰尘会造成清洁不便，用户容易产生疲劳烦躁的情绪；集尘盒的材料多以塑料为主，因此在扫地机器人工作状态下，由于内部电机的作用，集尘盒产生静电，导致大量的灰尘吸附在集尘盒内部；由于集尘盒形状不规则

		焯值	权重	开关	红外感应器	行走电动机	驱动轮	万向轮	外部传感器	线加速计	陀螺仪	滤尘网	集尘盒	灰度传感器	真空吸尘电动机	风机	边刷	边刷电机	关系总计	有益关系	有害关系	有益百分比	有害百分比	百分比差
+AAA	移动能力	0.9395	0.1386			+	+	+		+	+						-		6	5	1	83.3	16.7	66.6
-AAA	制造声音	0.9440	0.1284			-	+	+			+	+			-	-	+	-	9	5	4	55.6	44.4	11.2
+AUA	启动开关	0.9702	0.0683	+	+														2	2	0	100	0	100
	续航能力	0.9555	0.1019			+				+			-	+					4	3	1	75	25	50
-AUA	附着垃圾	0.9336	0.1523										+	-	+				3	2	1	66.7	33.3	33.4
+AEA	清洁能力	0.9454	0.1252									+	-	+	+	+	+	+	7	6	1	85.7	14.3	71.4
	检测垃圾	0.9517	0.1106			+	+	+	+	+	+			+					7	7	0	100	0	100
	规避障碍	0.9579	0.0965			+	-	-	+	+	+								6	4	2	66.7	33.3	33.4
	贴合地面	0.9661	0.0776					+	+										2	2	0	100	0	100
关系总计				1	1	5	5	5	2	4	4	3	3	2	4	2	3	3						
有益关系				1	1	4	4	4	2	4	4	3	0	2	3	1	2	2						
有害关系				0	0	1	1	1	0	0	0	0	3	0	1	1	1	1						
有益百分比				100	100	80	80	80	100	100	100	100	0	100	75	50	66.7	66.7						
有害百分比				0	0	20	20	20	0	0	0	0	0	0	25	50	33.3	33.3						
百分比差				100	100	60	60	60	100	100	100	100	-100	100	50	0	33.4	33.4						

图6 扫地机器人的可供性结构矩阵
Fig.6 Affordance structure matrix of sweeping robot

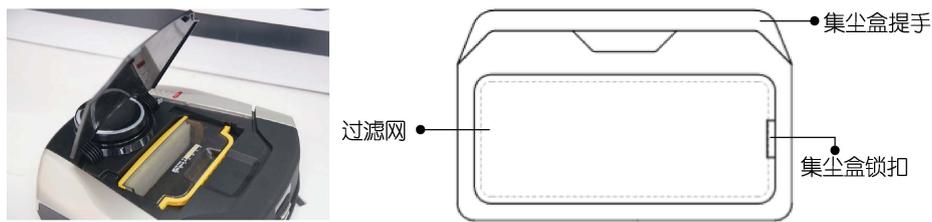


图 7 现有扫地机器人得得集尘盒及结构图

Fig.7 Dust collecting box and structure diagram of existing sweeping robot

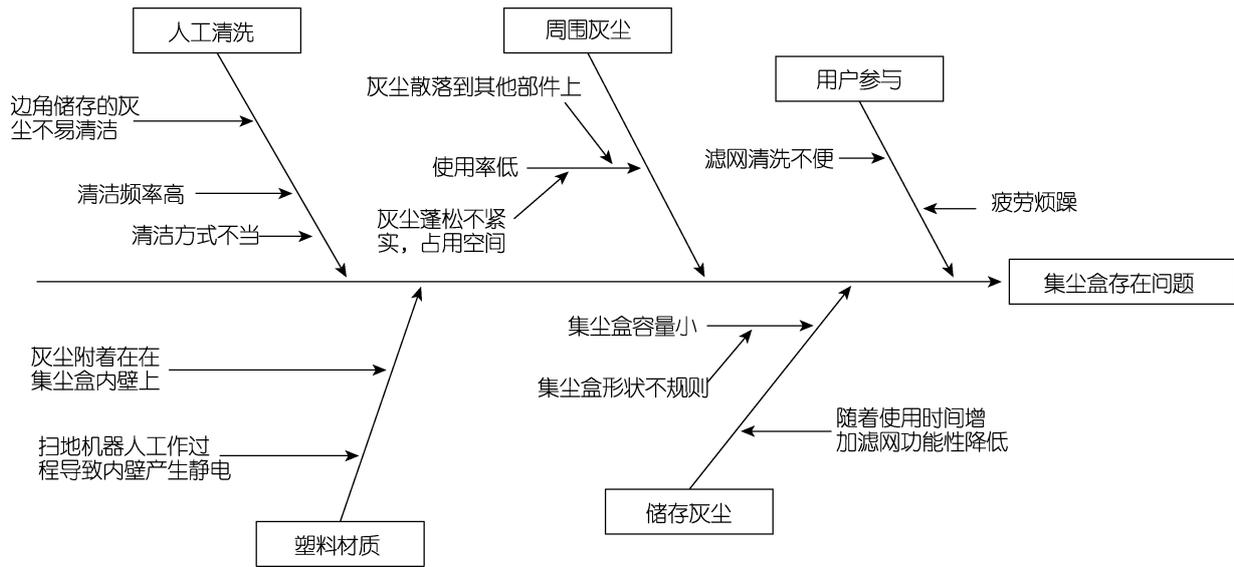


图 8 集尘盒的鱼骨图分析

Fig.8 Fishbone diagram analysis of dust collecting box

造成其集容量小, 并且随着使用次数增加集尘盒的滤网性能较低, 最终导致存储灰尘的效果不佳; 灰尘蓬松不紧实, 浪费集尘盒的空间, 造成其使用率低。

通过鱼骨图的分析将集尘盒的用户需求概括为两方面: 清洗方便、储存灰尘的效果好。针对用户需求确定设计要求如下: 清洁方面, 边角的设计不易太过尖锐, 造成灰尘堆积, 不易清理; 降低内壁的吸附性, 避免灰尘过多地吸附在集尘盒内壁的边角空间; 改善滤网清洗的现状, 提高对滤网的清洁力度使其保持干净。储存灰尘方面, 增强对灰尘垃圾的吸附, 使集尘盒中的灰尘紧实一些, 充分利用集尘盒的各个空间角落; 增大集尘盒的容量或者提高集尘盒的空间利

用率; 提高过滤灰尘的性能。最终将两大类的用户需求分析、拆解为具体的设计要求, 如表 3 所示。

上述设计要求中存在的冲突描述: 为了提高集尘盒的存储效果, 需要提高集尘盒内壁对灰尘垃圾的吸附性, 使集尘盒中的灰尘紧实一些, 但是这会造灰尘吸附在集尘盒内壁的边角空间, 给清洁带来不便; 集尘盒中的滤网易积攒灰尘, 需要提高对其清洁力度, 但是高频率的清洁会造成滤网过滤灰尘的性能降低; 为了提高清洁效率, 需要使集尘盒容积变小以减少清洁面积, 但是为了增大集尘盒的空间利用, 需要使集尘盒体积变大。将存在的冲突问题进行分类, 利用冲突矩阵检索出可用的发明原理, 结果如表 4 所示。

表 3 集尘盒的设计要求

Tab.3 Design requirements of dust collecting box

用户需求	序号	设计要求
清洁方便	1	边角的设计不易太过尖锐
	2	降低内壁的吸附性, 避免灰尘过多地吸附在集尘盒内壁的边角空间
存储灰尘效果好	3	提高对滤网的清洁力度使其保持干净
	4	减少集尘盒清洗面积
	5	增强对灰尘垃圾的吸附, 使集尘盒中的灰尘紧实一些, 充分利用集尘盒的各个空间角落
	6	增大集尘盒的容量以提高集尘盒的空间利用率
	7	提高过滤灰尘的性能

4.3 设计结果展示

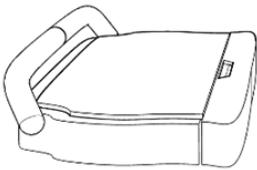
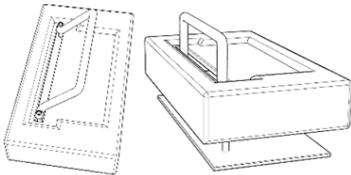
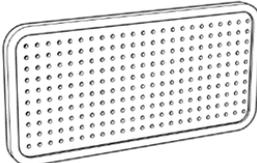
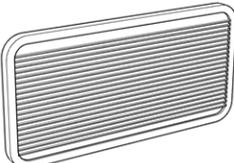
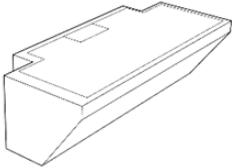
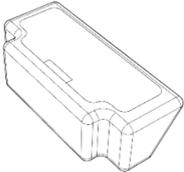
利用冲突矩阵寻找到可用的发明原理,对集尘盒

进行改良设计,分别对集尘盒的把手、滤网、外形进行再设计,并与原有设计进行简单对照,如表5所示。

表4 集尘盒创新设计可用的发明原理
Tab.4 Innovative design principle of dust collecting box

冲突描述	冲突分类	参数分析	可用发明原理
为了提高集尘盒的存储效果,需要提高集尘盒内壁对灰尘垃圾的吸附性,使集尘盒中的灰尘紧实一些,但是会造成灰尘吸附在集尘盒内壁的边角空间,给清洁带来不便	技术冲突	改善的参数:物质或事物的数量	气动与液压结构
集尘盒中的滤网易积攒灰尘,需要提高对其清洁力度,但是高频的清洁会造成滤网过滤灰尘的性能降低	技术冲突	恶化的参数:可操作性	用低成本、不耐用的物体代替昂贵耐用的物体
为了提高清洁效率,需要使集尘盒容积变小以减少清洁面积,但是为了增大集尘盒的空间利用,需要使集尘盒体积变大	物理冲突	考虑到该参数“集尘盒的容积”在不同的条件下具有不同的特性,因此该冲突可以从条件上进行分离	曲面化

表5 设计方案对比
Tab.5 Comparison of design schemes

原有设计	设计方案	说明
		对集尘盒的把手进行设计,集尘盒顶部有槽,把手可以转动,与把手相连有一个压板,可以根据需要转动把手,通过顶部的槽将压板向下压,起到压缩垃圾的作用,同时压缩后的块装垃圾更方便清理。
		现有过滤网需要定期清洗,随着清洗频率增加过滤功能会降低采用成本较小的过滤棉,备份多个,可用作一次性使用也可清洗循环利用。
		集尘盒的位置决定其形状的不规则性,边角尖锐降低了集尘盒存储灰尘的容积,同时容易积攒灰尘,难以清洁。 对不规则集尘盒的边角做圆角处理,圆润的边角便于清理。

设计结果可以说明,可用的发明原理能够十分高效地为设计者提供设计灵感,进而让其快速产生设计方案;最终的设计结果相较于原有的设计来说,能够有效地避免原有设计的弊端。在下述设计方案的对比中,发现新的设计方案对比原有的设计方案,具有美观、革新、实用、追求细节的特点。

5 结语

将情感-熵值法这种客观的赋权方法对可供性参数进行赋值,提出了基于情感与可供性结构矩阵的产品创新设计过程。利用扫地机器人对过程进行了验证,完成了对扫地机器人的集尘盒改良设计,证明了

基于情感因素与可供性结构矩阵结合的产品创新设计方法具有实用性及有效性。

虽然利用情感因素对现有的可供性结构矩阵进行了一定程度的优化,但仅仅针对该矩阵的第一输入-可供性参数的赋权进行了研究,并没有涵盖可供性结构矩阵中其他参数及交互关系,还需要深入挖掘可供性结构矩阵中其他的创新可能性。

参考文献:

[1] GIBSON J J. The ecological approach to visual perception[M]. Boston: Houghton Mifflin, 1979.

- [2] YOU H C, et al. Applications of Affordance and Semantics in Product Design[J]. *Design Studies*, 2007, 28(1): 23-38.
- [3] KANNENGIESSER U, GERO J S. A Process Framework of Affordances in Design[J]. *Design Issues*, 2012, 28(1): 50-62.
- [4] 许晓峰, 高颖. 服务设计中的可供性评价体系及其应用研究[J]. *装饰*, 2015(2): 108-110.
XU Xiao-feng, GAO Ying. Research on Affordance Evaluation System and Its Application in Service Design[J]. *Art & Design*, 2015(2): 108-110.
- [5] 白仲航, 李颖, 宋美佳, 等. 基于可供性的产品造型设计及评价研究[J]. *包装工程*, 2021, 42(22): 103-107, 114.
BAI Zhong-hang, LI Ying, SONG Mei-jia, et al. Design and Evaluation of Product Modeling Based on Affordance[J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(22): 103-107, 114.
- [6] 刘光辉. 基于情感化设计下的未来产品设计发展趋势[J]. *山东工业技术*, 2019(7): 232-234.
LIU Guang-hui. Development Trend of Future Product Design Based on Emotional Design[J]. *Shandong Industrial Technology*, 2019(7): 232-234.
- [7] 白仲航, 邢丽, 赵芳华. 从可供性视角看待情感三层次理论在产品中的应用[J]. *包装工程*, 2020, 41(22): 21-26.
BAI Zhong-hang, XING Li, ZHAO Fang-hua. Application of the Emotional Hierarchy Theory in Product Design from the Perspective of Affordance[J]. *Packaging Engineering*, 2020, 41(22): 21-26.
- [8] MAIER J, SANDEL J, FADEL G. Extending the Affordance Structure Matrix – Mapping Design Structure and Requirements to Behavior [C]. In: Conf. M'08. Stockholm, 2008.339-346.
- [9] MAIER J R A, FADEL G M. Affordance Based Design: A Relational Theory for Design[J]. *Research in Engineering Design*, 2009, 20(1): 13-27.
- [10] NGUYEN M T, FADEL G M, GUARNERI P, et al. Genetic algorithms applied to affordance based design[C]//Proceedings of ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Chicago, Illinois, USA. 2013: 689-695.
- [11] 马雪梅, 宋天明, 王义. 可供性理论视角下的外部空间设计研究[J]. *中国园林*, 2018, 34(10): 93-97.
MA Xue-mei, SONG Tian-ming, WANG Yi. External Space Design Research from the Perspective of Affordance[J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2018, 34(10): 93-97.
- [12] 姜少飞, 周升铭, 李吉泉, 等. 基于物-场可供性模型提升产品设计质量的研究[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(15): 128-138.
JIANG Shao-fei, ZHOU Sheng-ming, LI Ji-quan, et al. Enhancing the Quality of Product Design Based on Substance-Field Affordance Model[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(15): 128-138.
- [13] 苏建宁, 彭正杰, 邱凯, 等. 基于信息熵和最小偏差的产品意象评价方法[J]. *机械设计*, 2022, 39(4): 129-134.
SU Jian-ning, PENG Zheng-jie, QIU Kai, et al. Product Image Evaluation Method Based on Information Entropy and Minimum Deviation[J]. *Journal of Machine Design*, 2022, 39(4): 129-134.
- [14] LI Li. Customer Satisfaction Evaluation Method for Customized Product Development Using Entropy Weight and Analytic Hierarchy Process[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2014, 77: 80-87.
- [15] MATA I, FADEL G, MOCKO G. Toward Automating Affordance-Based Design[J]. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 2015, 29(3): 297-305.

责任编辑: 马梦遥