

基于 QFD—PUGH 的人机界面评价方法研究

李 惠¹, 王时英², 李娟莉²

(1. 太原理工大学机械与运载工程学院, 山西 太原 030024;
2. 太原理工大学工业设计系, 山西 太原 030024)

摘 要: 人机界面的设计优化包括用户需求转化为设计需求的准确性和设计需求形成最优方案 2 部分, 设计评价是界面设计优化的重要手段。在当前的评价方法中, 上述两者是分阶段进行, 数据共享性差。针对该问题, 提出一种基于质量功能展开(QFD)和 PUGH 决策矩阵融合的人机界面评价方法。首先运用层次分析法确定人机界面的用户需求权重, 结合界面产品特性将对应的用户需求映射为相关设计需求; 接着基于 QFD 构建质量屋模型, 根据用户需求和设计需求相关程度的矩阵得出界面设计需求要素的权重, 实现了将用户主观描述的需求转化为界面优化的设计需求; 最后将 QFD 模型得出的设计需求及其权重作为 PUGH 决策评价的标准, 选出最优界面设计方案, 完成对人机界面设计的综合评价。以家用跑步机的人机界面评价为例, 验证了 QFD 和 PUGH 融合的人机界面评价方法的有效性, 为完整的人机界面实现过程提供了决策方法和优化思路。

关 键 词: 质量功能展开; PUGH 决策矩阵; 用户需求; 人机界面评价

中图分类号: TB 472

DOI: 10.11996/JGJ.2095-302X.2021061043

文献标识码: A

文章编号: 2095-302X(2021)06-1043-08

Research on human-machine interface evaluation method based on QFD-PUGH

LI Hui¹, WANG Shi-ying², LI Juan-li²

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi 030024, China;
2. Department of Industry Design, Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi 030024, China)

Abstract: The human-machine interface design and optimization consists of the transformation from user demand to design demand and the formation of the best program based on design demand. Evaluation is significant for design optimization, while in the existing studies on evaluation method, the above two parts are performed in different stages, leading to inefficiency in data sharing. For this problem, an evaluation method of human-machine interface based on quality function deployment (QFD) and the PUGH decision matrix was put forward. Firstly, the Analytic Hierarchy Process was adopted to produce the weight of user demand, and corresponding user needs were mapped to relevant design requirements based on interface product features. Then a house of quality model was built based on QFD. According to the matrix of the degree of correlation between user requirements and design requirements, the weight was obtained, and the user's subjective description was transformed into the design requirements. Finally, the design

收稿日期: 2021-03-09; 定稿日期: 2021-04-13

Received: 9 March, 2021; Finalized: 13 April, 2021

基金项目: 山西省研究生教育改革研究课题资助项目(2017JG30); 山西省自然科学基金资助项目(RZ19100134)

Foundation items: Shanxi Province Graduate Education Reform Research Project Funding Project (2017JG30); National Natural Science Foundation of Shanxi Province (RZ19100134)

第一作者: 李 惠(1994-), 女, 山西大同人, 硕士研究生。主要研究方向为产品造型设计和人机界面交互设计。E-mail: 2998379574@qq.com

First author: LI Hui (1994-), female, master student. Her main research interests cover product styling design and human-computer interface interaction design. E-mail: 2998379574@qq.com

通信作者: 王时英(1964-), 男, 山西运城人, 教授, 博士。主要研究方向为齿轮精密超精密加工及功率超声加工、工业设计工程。
E-mail: wsyabede@163.com

Corresponding author: WANG Shi-ying (1964-), male, professor, Ph.D. His main research interests cover gear precision ultra-precision machining and power ultrasonic machining, industrial design engineering. E-mail: wsyabede@163.com

requirements and weights derived from the QFD were employed as the criteria for PUGH decision-making evaluation, the best scheme was chosen, thus completing a comprehensive evaluation of interface design. Taking the interface of the household treadmill as an example, it shows the effectiveness of the proposed method, and provides decision-making method and optimization ideas for the whole process of human-machine interface implementation.

Keywords: quality function deployment; PUGH decision matrix; user demand; human-machine interface evaluation

人机界面设计是一个以获取用户需求为出发点,完成用户需求到设计需求的转化、设计需求指导最优设计方案形成的完整过程^[1]。最优化的设计方案以符合人机界面的设计原则为前提,更重要的是最大限度符合用户需求。人机界面的设计评价为界面设计提供了方案决策依据,指明了优化方向,对于指导界面设计具有重要意义。

人机界面的设计评价通常包括用户需求评价和界面设计方案评价 2 个方面,国内外学者对此开展了大量的研究和分析工作。

在需求评价方面,单鸿波和李淑霞^[2]根据用户需求调查结果采用模糊矩阵对各用户需求进行表达,用熵处理简化用户需求模糊矩阵,获取用户需求重要度排序;高涵和许继峰^[3]通过构建老年人健康监测需求指标体系,利用层次分析法计算各需求指标的权重,结合现状对需求重要性评价结果进行了分析,指导了健康监测产品设计;TOMDIECK 等^[4]使用亲和力和映射方法分析可穿戴智能眼镜的用户需求,结果表明内容要求、功能要求、舒适性、体验和阻力在开发和实施可穿戴 AR 应用时的不同重要度等级,为设计实践指明了方向。

在界面设计方案的评价研究方面,文献[5-6]使用用户体验方法分别评估官方商店和手机移动应用程序的用户界面,包括性能指标、自我报告指标、行为指标和基于问题指标,评估用户在交互时产生的绩效、感知、行为和问题,根据结果完成策略评价和界面设计建议;赵彩云等^[7]从提高界面造型与企业文化融合度出发,提出基于企业意象风格、美度评价、绩效测评 3 方面融合的健身器材界面评估标准,运用模糊层次分析法完成了多目标意向下方案的最优决策评价;袁树植等^[8]通过将灰色关联分析法引入群层次分析法得出感性评价体系中感性指标权重,建立了一种直觉模糊集理论和逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)相结合的综合评价模型,提供了有效评价方法。

在上述相关评价方法的研究中,关于用户需求

评价与设计方案评价是相互割裂的状态,较少关注如何以设计需求作为用户需求与设计方案评价的结合点,将需求转化和评价决策 2 部分进行融合。本文结合质量功能展开(quality function deployment, QFD)和 PUGH 决策矩阵(PUGH decision matrix)方法的特点提出一种人机界面评价方法,在分析用户对于人机界面的需求前提下,将 QFD 方法得到的设计需求及权重作为 PUGH 决策评分的标准,形成了从用户需求到最优方案的系统评价方法,并以某企业的跑步机人机界面设计方案为例验证了该方法的完整性和可用性。

1 基于 QFD-PUGH 人机界面评价方法研究框架

用户需求分析是设计评价的基础,质量屋(the house of quality, HOQ)模型通过将主观评价转换为定量评价实现用户需求到设计需求要素的转化。本文方案评价模型主要分为 QFD 完成需求转化和 PUGH 决策评分 2 部分。

(1) QFD 需求转化。为了避免信息偏差,获取用户需求时只对核心用户和专业研发人员进行访谈和问卷调查,根据获取的用户需求进行分类整理后,首先构建用户需求层次^[9],确定用户需求权重值,其次基于 QFD 构建质量屋模型,实现需求的量化转换。

(2) PUGH 决策评分。通过构建 PUGH 决策矩阵对界面方案进行综合评分排序,完成界面设计方案的最终评价。评价方法研究框架如图 1 所示。

2 基于 QFD 确定设计需求重要度

2.1 用户需求权重值计算

QFD 是产品设计过程中实现需求转化的重要方法,而质量屋模型是 QFD 方法的核心工具,通过构建质量屋模型得到设计需求相对重要度的关键前提为获取用户需求权重值,借助层次分析法的计算原理^[10]求得用户需求权重值,进而依据 QFD

的赋值原理完成用户-设计需求的定量转换。用户需求权重计算流程如下:

(1) 构造判断矩阵。引用 Saaty 提出的 9 级标度法^[11], 根据两两元素比较原则构建判断矩阵, 用 u_{ij} 表示第 i 个用户需求相较于第 j 个用户需求的重要程度。构建判断矩阵 $U=(u_{ij})_{n \times n}$, 计算判断矩阵 U 每行因素积的 n 次方根为 $\bar{W}_i$, 进行向量归一化处理得到特征向量, 用户需求权重值为

$$w_i = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{k=1}^n \bar{W}_k}, \quad i=1,2,\dots,n \quad (1)$$

(2) 计算判断矩阵的最大特征根

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(UW)_i}{nW_i} \quad (2)$$

其中, $(UW)_i$ 为向量 UW 的第 i 个元素; $\lambda_{\max}$ 为一致性检验的重要元素。

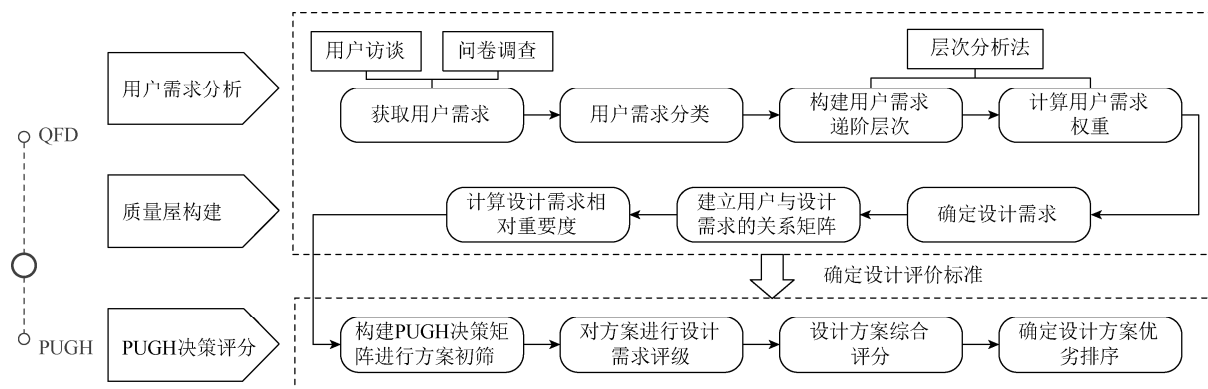


图1 人机界面设计评价框架

Fig. 1 Human-machine interface design evaluation model

(3) 避免指标相对重要度出现自相矛盾的情况, 需进行一致性检验, $CR < 0.10$ 时, 矩阵具有一致性, 权重值有效, 确定用户需求的权重值为 w_i , 一致性检验计算为

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

其中, CI 为一致性指标(consistency index); RI 为平均随机一致性指标(random consensus index); CR 为一致性比率(concordance ratio), $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$ 。取值见表 1。

表 1 矩阵的 RI 值									
Table 1 RI value of matrix									
指标	矩阵阶数								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

2.2 构建质量屋确定设计需求相对重要度

将计算得出的用户需求权重值代入到质量屋模型(图 2)中, 借助质量屋模型实现用户需求的传递, 通过关系程度比例赋值形成用户-设计需求的相关矩阵, 确定对应的设计需求要素及其相对重要度^[12], 本文采用可用于表征用户需求与产品特性

关系最有效的 0, 1, 3, 5 比例标度, 表示用户需求 U_i 与设计需求 N_j 的相关度 R_{ij} , 其数字分别代表无相关、弱相关、中相关、强相关^[13]。

设计需求 N_j , 重要度 n_j 和相对重要度 v_j 计算为

$$n_j = \sum_{i=1}^n w_i \cdot R_{ij}, \quad i=1,2,\dots,n \quad (4)$$

其中, n 为用户需求的数量。

$$v_j = \frac{n_j}{\sum_{j=1}^m n_j}, \quad j=1,2,\dots,m \quad (5)$$

其中, m 为设计需求的数量。

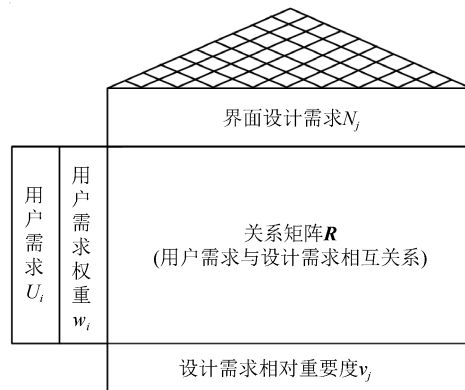


图2 质量屋模型

Fig. 2 Quality house model

3 构建 PUGH 矩阵进行方案评价

3.1 PUGH 矩阵评价原理及方法

PUGH 矩阵又称概念决策矩阵,是一种定量决策分析工具,适用于评估决策的各个阶段,对设计概念进行高效、系统评估^[14]。其保留了明确、有记录的筛选过程,实现了多因素综合评价下从大量备选方案中快速识别明显优势概念的目标^[15]。

PUGH 矩阵用于人机界面方案的选择评价主要分为 4 步:

(1) 由专业评估小组成员根据 QFD 中分析得出的界面设计因素及权重从待评价方案中确定一个基准方案。

(2) 建立人机界面评价矩阵。其列由界面评价指标、各项评价符号的得分以及方案总得分组成,行由界面设计方案组成。

(3) 采用“+”“-”和“S”符号对方案进行评分。“+”表示可选方案在该指标下优于基准方案,“-”表示劣于基准方案,“S”表示相同^[16]。

(4) 在构建好的矩阵结构表中,依照评价标准将每个界面方案的每一项评估准则与设定的基准方案一一比较。对所有方案的评分符号进行统计,并得出方案评价总分,从而获得设计方案的优劣次序,完成方案的初步筛选^[14]。

3.2 人机界面设计方案概念评分及排序

对通过初步筛选的设计方案进行综合概念评分,完成进一步客观详细决策。

(1) 构建 PUGH 评分决策矩阵。从参与评价的方案中确定一个为参照标准,按照 1~5 分的评分标准对各个方案的每项指标进行评价。将通过 QFD 构建质量屋得出的第 j 个设计需求的指标权重值 v_j 与第 q 个方案的第 j 个指标评分等级 d_{jq} 相乘,计算不同方案每项指标的得分 P_{jq} ,将每个方案的 m 项指标加权得分进行求和计算,得出方案综合评分 S_q ,即

$$P_{jq} = v_j \cdot d_{jq} \quad (6)$$

$$S_q = \sum_{j=1}^m P_{jq} \quad (7)$$

(2) 将人机界面方案按照综合评分进行从高到低排序,得出最佳界面设计决策及优化方向,完善设计评价流程,为新的人机界面设计提供优化理论基础,节约设计研发时间。

4 跑步机人机界面设计实例评价

随着全民健身理念和智能数字技术的兴起,跑步机作为人们追求健康生活的首选,在发展过程中其功能也变得多样化,主要体现在复杂的人机界面操作中,只有准确了解用户需求才能够提高用户在交互过程中的满意度。为验证本文方法在人机界面评价的可行性,以某企业跑步机人机界面设计项目方案为例进行评价验证。

4.1 确定跑步机人机界面用户需求及权重

为了确保获取的跑步机人机界面用户需求信息具有针对性和有效性,本文选取了有长期健身经验和跑步机使用经验的 52 名资深用户,为了减少长期使用经验导致的习惯行为对于数据造成的主观性影响,同时选取了 28 名初次使用跑步机的新手用户进行了用户访谈和问卷调查,其中男女性别比例为 43:37,年龄段为 25~45 岁。

由 15 名设计专业的研究生和 7 名教师组成设计小组,对问卷结果进行整理筛选,获取的有效用户需求包括按键形态便于运动时操作、不同跑步模式的快捷切换、实时反馈训练效果等 15 项。根据亲和图法(affinity diagram,又称 KJ 法),的分类准则将初始需求作为基础样本分别制作成 15 张单独的卡片,将内容相似的卡片划分为一组,并制定适当的标题卡,再将内容相似的标题卡进行同组划分并赋予标题,依次重复上述步骤,直到无法再进行合并。最后 15 项用户需求分为形态、色彩、功能、情感和美学^[17]5 大类需求,获得递阶层次化结构的用户信息,见表 2。

根据用户需求的层次结构,借助层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)的评分原则与矩阵构建方法,确定用户需求的综合权重。根据式(1)计算每一层元素相对上一层次的需求权重值,式(2)和(3)进行一致性检验,对形态需求 $U1$ 、色彩需求 $U2$ 、功能需求 $U3$ 、情感需求 $U4$ 和美学需求 $U5$ 中的各个子评价指标: $U1=\{U11,U12,U13\}$, $U2=\{U21,U22\}$, $U3=\{U31,U32,U33\}$, $U4=\{U41,U42,U43\}$, $U5=\{U51,U52,U53\}$ 分别进行成对比较,计算得出用户需求权重,即

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 1/2 & 2 & 2 \\ 1/3 & 1 & 1/4 & 1/2 & 1/2 \\ 2 & 4 & 1 & 2 & 2 \\ 1/2 & 2 & 1/2 & 1 & 1 \\ 1/2 & 2 & 1/2 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$U1=\begin{pmatrix} 1 & 3 & 1/2 \\ 1/3 & 1 & 1/4 \\ 2 & 4 & 1 \end{pmatrix}, U2=\begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 1/2 & 1 \end{pmatrix}$$
$$U3=\begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 1/2 & 1/4 \\ 3 & 1 & 2 & 1/2 \\ 2 & 1/2 & 1 & 1/3 \\ 4 & 2 & 3 & 1 \end{pmatrix}$$

$$U4=\begin{pmatrix} 1 & 3 & 4 \\ 1/3 & 1 & 2 \\ 1/4 & 1/2 & 1 \end{pmatrix}, U5=\begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 2 \\ 3 & 1 & 5 \\ 1/2 & 1/5 & 1 \end{pmatrix}$$

最后将第三层次需求的权重值分别与之对应的第二层次需求权重值相乘，得到各项用户需求的综合权重，见表 3。经计算其中 CR 计算值均符合一致性检验。

表 2 跑步机界面设计用户需求结构表

Table 2 Treadmill interface design user demand structure table

需求层次 1	需求层次 2	需求层次 3
符合用户生理和心理需求 U	形态需求 U1	按键形态便于运动时操作 U11 显示屏形态便于观察 U13
	色彩需求 U2	配色醒目主次分明 U21 按键色彩符合功能特性 U22
	功能需求 U3	不同跑步模式的快捷切换 U31 不同强度的调节 U33
	情感需求 U4	安全感 U41 科技智能感 U43
	美学需求 U5	界面布局简洁 U51 按键与显示屏布局协调 U53
		按键形态可区分不同功 U12 训练效果反馈及时 U32 训练时间设定方便 U34 灵活感 U42 布局整体平衡 U52

表 3 跑步机界面设计用户需求权重

Table 3 User demand weight of treadmill interface design

需求项	权重值	需求项	权重值	需求项	权重值
U11	0.095	U31	0.034	U42	0.037
U12	0.028	U32	0.099	U43	0.021
U13	0.131	U33	0.057	U51	0.036
U21	0.054	U34	0.166	U52	0.100
U22	0.027	U41	0.097	U53	0.019

4.2 跑步机界面的设计需求需求分析

将用户需求转化为设计需求是构建质量屋的目标，设计小组成员结合用户需求与界面使用特性，对家用跑步机人机界面设计需求进行映射分析和分类。以形态需求映射为例(图 3)，按键形态应

便于在运动时操作，U11 的用户需求则在设计时需考虑按键本身的尺寸大小是否符合人机工程学的相关对应数据，按键与按键之间的间距是否会影响跑步时操作的准确性，以及按键的形态在跑步时触摸是否舒适。同理分析得出功能需求、按键特性、显示屏特性和整体布局 4 项一级设计需求和多模式功能、数据反馈及时、触感舒适等 10 项二级需求，如图 4 所示。

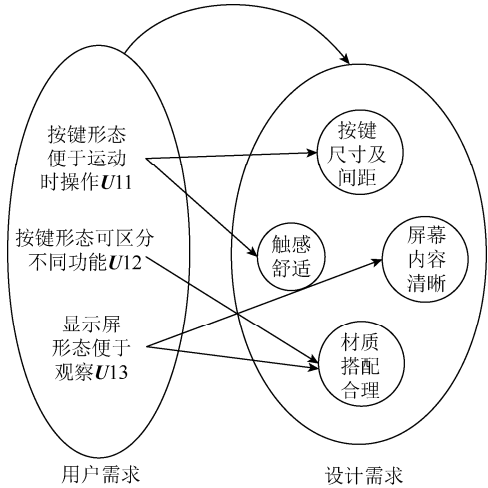


图 3 需求映射图

Fig. 3 Users demand map

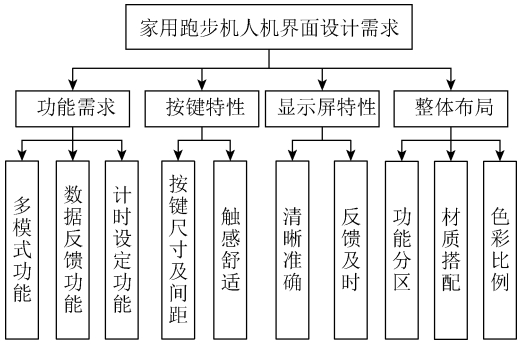


图 4 设计需求递阶层次图

Fig. 4 Hierarchy of design requirements

将用户需求、综合权重值和设计需求按照图 2 的配置方式带入质量屋，根据式(4)和式(5)计算出各项设计需求的相对重要度即设计需求权重，如图5所示。

4.3 基于 PUGH 家用跑步机人机界面设计方案选择

4.3.1 设计方案初步评价及选择

为了确保该评价具有一定参考价值及评价结

果的客观性，邀请该企业中健身器研发项目中的 8 名设计师、4 名技术工程师共 12 名专家组成决策小组，选取在相同设计需求背景下，造型风格和市场定位一致的 8 款家用跑步机人机界面作为待评价方案，并由 12 名专家小组成员经过讨论、对比、综合分析，完成对方案的初步评价，构建 PUGH 决策矩阵见表 4。

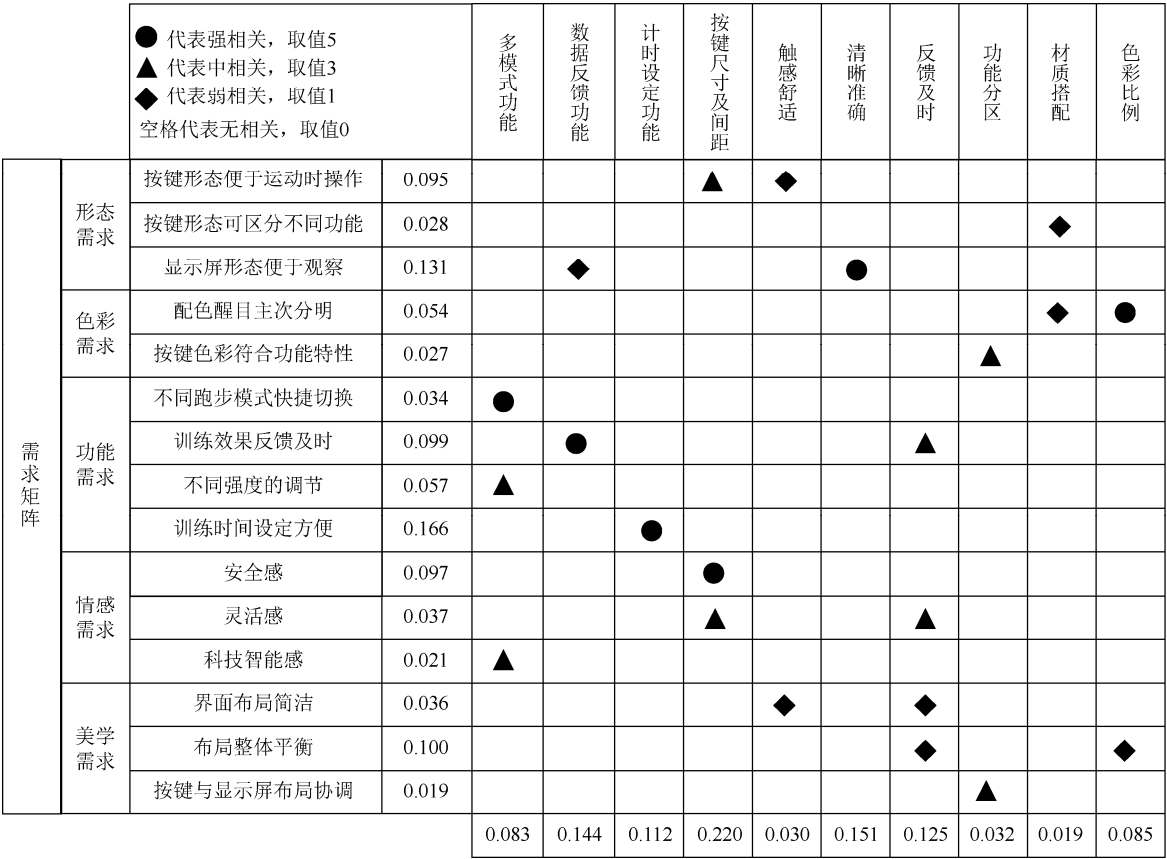


图 5 用户需求与设计需求相关关系矩阵

Fig. 5 Matrix of relevance between user requirements and design requirements

表 4 跑步机界面设计方案粗筛 PUGH 决策矩阵

Table 4 Coarse screening PUGH decision matrix of Treadmill interface design

家用跑步机人机界面设计方案								
参数								
功能需求	+	S	+	+	S	+	+	-
按键特性	+	S	-	-	-	+	S	+
显示屏特性	+	S	-	-	-	+	-	+
整体布局	S	S	-	-	S	+	-	+
“+”总数	3	0	1	1	0	4	1	3
“S”总数	1	4	0	0	2	0	1	0
“-”总数	0	0	3	3	2	0	2	1
净分数	3	0	-1	-2	-2	4	1	2
排序	2	4	5	6	6	1	5	3
舍弃/继续	继续	继续	舍弃	舍弃	舍弃	继续	舍弃	继续

注：优于“+”；相同“S”；劣于“-”

12 名专家组成员投票结果选出方案 B 作为基准方案，将其他方案与方案 B 进行比较评价，得出各方案的综合净分数并从高到低排序。筛掉排名最后的 4 个方案，最终方案 A，B，F 和 H 进入综合概念评分阶段，进行详细的量化评价。

4.3.2 设计方案综合评价

将问卷信息进行整理、分析和归纳，对初步筛

选的 4 款界面设计方案，统计其在功能需求、按键特性、显示屏特性和整体布局 4 个方面的评价数据。以方案 B 为评价标准方案(B 的评价得分均为 3)，根据 5 级评价标准对方案 A、D、F 进行评级，构建概念评分 PUGH 决策矩阵，结合每一指标相应的权重数值，根据式(6)和(7)计算每个方案指标对应的加权评分，见表 5。

表 5 跑步机界面设计方案综合评分
Table 5 Comprehensive score of treadmill interface design scheme

设计评价指标		权重	方案 A		方案 B		方案 F		方案 H	
			等级	得分	等级	得分	等级	得分	等级	得分
功能需求	多模式功能	0.083	4	0.332	3	0.249	5	0.415	2	0.166
	数据反馈功能	0.144	2	0.228	3	0.432	3	0.432	3	0.432
	计时设定功能	0.112	4	0.448	3	0.336	3	0.336	3	0.336
按键特性	按键尺寸及间距	0.220	2	0.440	3	0.660	3	0.660	4	0.880
	触感舒适	0.030	4	0.120	3	0.090	2	0.060	2	0.060
显示屏特性	清晰准确	0.151	3	0.453	3	0.453	3	0.453	3	0.453
	反馈及时	0.125	4	0.500	3	0.375	2	0.250	3	0.375
整体布局	功能分区	0.032	3	0.096	3	0.096	4	0.128	2	0.064
	材质搭配	0.019	4	0.076	3	0.057	3	0.076	2	0.038
	色彩比例	0.085	3	0.255	3	0.255	3	0.255	2	0.170
综合评分			3.008		3.003		3.065		2.974	

据表 5 的数据结果，家用跑步机人机界面设计方案排序为：方案 F>方案 A>方案 B>方案 H，即方案 F 为最优设计方案。为了进一步优化设计方案，提高跑步机界面的操作效率和用户需求满意度，对方案 F 进行改进设计。通过表 6 可以看到，方案 F 在显示屏特性的反馈及时和触感舒适这 2 项设计指标的得分较低，分别为 0.250 和 0.060，而方案 A 的 2 项设计指标得分最高，分别为 0.500 和 0.120。同时从图 4 中可知数据反馈功能和反馈及时 2 项设计需求权重值较高，即相对重要度高，因此选择方案 A 为主要设计参考，针对数据反馈和触感舒适相关设计需求对方案 F 进行 方案优化和详细设计。

5 结 论

(1) 依据层次分析法确定人机界面的用户需求权重，结合人机界面的设计原则将对应的

用户需求映射为相关设计需求，基于 QFD 构建质量屋模型，根据用户需求和设计需求相关程度的矩阵得出界面设计需求的权重值，完成了将用户带有主观情感的需求转化为界面优化的设计需求。

(2) 运用 PUGH 决策矩阵完成了人机界面设计方案的初步筛选，以设计需求、需求权重和需求评级构建 PUGH 评分矩阵用于决策，根据评分排序结果得出了设计的最优参考方案，通过分析需求的重要程度得出设计的优化重点。

(3) 提出了一种 QFD 和 PUGH 决策矩阵融合的人机界面评价方法，将需求映射和 QFD 得出的设计需求及相对重要度作为 PUGH 决策矩阵的设计评价标准，实现了以设计需求为结合点，用户需求转化为设计需求和设计需求指导决策评分 2 部分的有机结合，为进一步人机界面的设计优化研究提供了决策方法和理论依据。

参考文献 (References)

- [1] 吴晓莉, 薛澄岐, 王海燕, 等. 复杂系统人机交互界面的 E-C 映射模型[J]. 机械工程学报, 2014, 50(12): 206-212.
WU X L, XUE C Q, WANG H Y, et al. E-C mapping model based on human computer interaction interface of complex system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(12): 206-212 (in Chinese).
- [2] 单鸿波, 李淑霞. 基于模糊集表达和熵处理的产品用户需求评价[J]. 工程设计学报, 2005, 12(6): 329-333.
SHAN H B, LI S X. Customer requirement retrieval for product based on fuzzy sets and entropy[J]. Journal of Engineering Design, 2005, 12(6): 329-333 (in Chinese).
- [3] 高涵, 许继峰. 基于 AHP 的老年人健康监测系统性需求评价研究[EB/OL]. [2021-04-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1094.TB.20200728.1157.010.html>.
GAO H, XU J F. Evaluating the systematic requirements of elderly health monitoring based on AHP[EB/OL]. [2021-04-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1094.TB.20200728.1157.010.html> (in Chinese).
- [4] TOMDIECK M C, JUNG T, HAN D I. Mapping requirements for the wearable smart glasses augmented reality museum application[J]. Journal of Hospitality and Tourism Technology, 2016, 7(3): 230-253.
- [5] LESTARI R A, MUSLIM E, MOCH B N. User interface evaluation of official store for FMCG (fast moving consumer goods) products in e-commerce website using user experience approach[EB/OL]. [2021-01-09]. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1516/1/012024/pdf>.
- [6] MUSLIM E, LESTARI R A, HAZMY A I, et al. User interface evaluation of mobile application krl access using user experience approach[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 508: 012110.
- [7] 赵彩云, 李娟莉, 任家骏, 等. 基于多因素融合的健身器材人机界面评价方法研究[J]. 图学学报, 2019, 40(5): 932-935.
ZHAO C Y, LI J L, REN J J, et al. Research on evaluation method of human-machine interface of fitness equipment based on multi-factor fusion[J]. Journal of Graphics, 2019, 40(5): 932-935 (in Chinese).
- [8] 袁树植, 高虹霓, 王巍, 等. 基于感性工学的人机界面多意象评价[J]. 工程设计学报, 2017, 24(5): 523-529.
YUAN S Z, GAO H N, WANG W, et al. Multi-image evaluation for human-machine interface based on Kansei engineering[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2017, 24(5): 523-529 (in Chinese).
- [9] 赵又群, 刘英杰. 基于改进模糊层次分析法的汽车操纵稳定性主观综合评价[J]. 中国机械工程, 2013, 24(18): 2519-2523.
ZHAO Y Q, LIU Y J. Research on subjective evaluation indexes for vehicle handling stability based on improved analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(18): 2519-2523 (in Chinese).
- [10] CHATZIMOURATIDIS A I, PILAVACHI P A. Multicriteria evaluation of power plants impact on the living standard using the analytic hierarchy process[J]. Energy Policy, 2008, 36(3): 1074-1089.
- [11] 陈蔚, 刘雪娇, 夏莹杰. 基于层次分析法的车联网多因素信誉评价模型[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2020, 54(4): 722-731.
CHEN W, LIU X J, XIA Y J. Multi-factor reputation evaluation model based on analytic hierarchy process in vehicle Ad-hoc networks[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2020, 54(4): 722-731 (in Chinese).
- [12] 陈亮, 窦昊, 魏煌, 等. 基于质量功能展开、发明问题解决理论和仿生学的产品创新设计[J]. 中国机械工程, 2020, 31(11): 1285-1295.
CHEN L, DOU H, WEI H, et al. Product innovation design based on QFD, TRIZ and bionics[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(11): 1285-1295 (in Chinese).
- [13] 张妮, 赵晓冬. 基于改进 QFD 的产品可持续设计模块重要度判定[EB/OL]. [2021-04-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20200623.1527.038.html>.
ZHANG N, ZHAO X D. Importance degree determination for product sustainable design modules based on improved QFD[EB/OL]. [2021-04-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20200623.1527.038.html> (in Chinese).
- [14] 李永斌. 可穿戴式智能血氧运动手环设计与研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015: 44-48.
LI Y B. Design and research for wearable smart oximetry sport ring[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015: 44-48 (in Chinese).
- [15] 曹国忠, 刘孟然, 万子薇. 基于进化树的碎纸机刀具变型设计[J]. 机械设计, 2019, 36(10): 121-126.
CAO G Z, LIU M R, WAN Z W. Variant design of shredder cutter based on phylogenetic tree[J]. Journal of Machine Design, 2019, 36(10): 121-126 (in Chinese).
- [16] ULRICH K T, EPPINGER S D. Product Design and Development [M]. 3rd. Boston: McGraw-Hill, 2004: 154-156.
- [17] 谢友柏. 论设计科学[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(7): 873-880.
XIE Y B. Design science[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2019, 53(7): 873-880 (in Chinese).