

人工智能产品人机交互设计标准化研究

王沙沙 吕镇 谢波 高晓红 王岩峰*

(中国标准化研究院)

摘 要: 人工智能技术的发展催生了大批量智能产品,推动了人机交互模式的转变,对人机交互设计提出更高要求。系统梳理人机交互技术在人工智能产品中的应用和发展,分析近几年的人机交互技术的发展趋势,构建面向人工智能产品的人机交互三维体系构架,理清人机交互设计领域工作范围和边界。研究交互设计标准化的必要性和可行性,梳理人工智能产品的交互设计中的标准化需求,结合目前国内外交互设计方面的标准化工作,提出人机交互设计领域标准化重点研究内容。

关键词: 人工智能产品, 人机交互, 标准化, 工业设计

DOI编码: 10.3969/j.issn.1674-5698.2024.02.003

Research on the Standardization of Human-Computer Interaction Design for Artificial Intelligence Products

WANG Sha-sha LYU Zhen XIE Bo GAO Xiao-hong WANG Yan-feng*

(China National Institute of Standardization)

Abstract: With the development of artificial intelligence (AI) technology, a large number of AI products have been produced, which promotes the transformation of human-computer interaction (HCI) mode and puts forward higher requirements for HCI design. The application and development of HCI technology in AI products are systemically summarized, the development trend of HCI technology in recent years is analyzed, and the three-dimensional architecture of HCI oriented to AI products is constructed, to clarify the scope and boundaries of HCI design. This paper studies the necessity and feasibility of HCI design standardization, identifies the standardization requirements, and combines the current standardization work of HCI design at home and abroad, creatively puts forward the key research contents of HCI design.

Keywords: artificial intelligence products, human-computer interaction, standardization, industrial design

基金项目: 本文受中央基本业务费项目“工业设计基础标准体系研究及重要标准研制”(项目编号: 262022Y-9452)资助。

作者简介: 王沙沙, 硕士, 从事工业设计基础标准化研究、工业产品质量安全标准化理论与应用技术研究。

吕镇, 硕士, 从事工业产品质量安全监管研究。

谢波, 高级工程师, 从事工业产品质量安全监管理论及标准化研究。

高晓红, 研究员, 从事工业设计标准化原理和方法、标准体系框架研究。

王岩峰, 通信作者, 高级工程师, 从事工业设计标准化原理和方法、工业产品质量安全标准化理论与应用技术研究。

0 引言

随着大数据、物联网、人工智能等智能制造技术的发展,物理世界和数字世界深度融合,智能技术融入产品设计中,使得智能产品富有人性化、艺术感和智慧特性^[1]。智慧属性促使智能产品人机交互方式发生了根本性变化,从传统的机械式交互,向软件平台控制转变,对人机交互设计提出了新的要求。交互方式和过程是消费者对产品感受最直观的地方,影响着用户对产品的第一印象。人机交互的形式也变得多种多样,用户有了更多的选择,单纯的美观已经无法满足消费者挑剔的眼光。如何让一款产品的交互操作更加便捷、舒适、愉快,符合消费者的需求和体验,进而得到更多消费者的青睐,已成为人机交互领域需要思考的重点问题之一^[2]。

人工智能产品是具备一定的感知、计算、存储能力,能够在物理和信息层面实现与人、其他智能设备、环境互动的产品^[3]。智能产品频繁出现在人们的生活中,人和智能产品之间发生信息传递必定依托各种交互行为,这就是人机交互过程。虽然智能产品的形态、特征、使用领域有很大差别,但其本质都是对信息的获取、处理和反馈,在信息的获取和反馈过程中都涉及到与用户的交流。不同的智能产品有不同的使用和体验风格,不同的数据传输方式、计算算法、数据类型等,需要在研究前期在交互设计中考虑策划标准化、统一性问题,避免出现多种类型并行,用户疲于在不同的交互逻辑中转换的情况出现。

随着计算机技术的发展,人机交互逐渐独立成一个单独的学科,由于其发展历史和学科特性,人机交互与人机工程学、人类工效学、心理学、社会学、计算机、工业设计等学科存在很多交集。交互设计这个名词最初主要是在计算机领域使用,随着智能产品的大量研发和使用,逐渐有了更广泛的含义,所以目前对交互设计有广义和狭义两种概念划分。狭义的交互设计主要是指人与计算机之间的信息交换过程和方式,即用户输入信息给计算机,计算机对输入信息进行识别、处理,再把

处理结果反馈给用户。广义的交互设计扩展到产品设计领域,涉及的产品包括电子产品、机器人、界面、软件、计算机等,这些对象可以是物质的、非物质的或多种方式的组合。本文研究的人工智能产品的人机交互设计属于广义范围的交互设计。

1 人机交互技术在人工智能产品中的发展和应用

人机交互是一门综合性交叉学科,人机交互技术的发展离不开各类学科领域新技术的研发和突破。按学科分类而言,计算机科学中,人机交互主要侧重对图像、视频、语义的识别,运用各种算法来实现人与智能产品的交互过程,偏向于计算机技术中系统、软件、算法等的设计。工业设计科学中,人机交互侧重对产品人机交互方式和交互界面的设计,通过类触觉、类视觉、类听觉、类嗅觉、脑机接口等交互方式,实现人对智能产品的操作和使用。

在人工智能产品的研发中,人机交互的研究热点主要集中在对新型交互方式和交互设备的研究,新技术的研发和应用,以及对弱势群体的关注等^[4]。在新型交互方式和设备方面,张毅等^[5]提出一种基于脑电 α/β 波的智能轮椅人机交互方法,Tseng等^[6]研究一种关于头戴显示器的物理交互方法和技术。在新技术应用方面,Chamunorwa等^[7]利用AR判断桌面可利用空间,Li等^[8]利用神经网络处理传感器数据。在关注弱势群体方面,许欢^[9]设计了一种基于智能算法的适老化智能家居人机交互系统,王沈策等^[10]探索面向老龄用户的农机产品人机交互设计。综上,预判近几年人机交互领域的总体研究趋势,具体情况见表1。

2 面向人工智能产品的人机交互设计三维体系构架

交互设计是信息社会的一种主流设计方向,与其他学科领域有着相互叠加和重合的关系。从技术层面而言,交互设计涉及计算机工程学、语言编

程、信息设备、信息架构学等；从实现价值层面，交互设计涉及人类的行为学、人因学、心理学等；从设计层面，交互设计涉及工业设计、界面表现、产品语义、视觉传达等^[11]。3个不同的方面之间也会相互影响，如：计算机技术的进步会直接影响人机交互的方式，进而改变交互设计方向，最终产品追求的实现价值不同，也会直接影响设计风格。技术、设计、实现价值这3个方面共同构成了交互设计，但彼此之间又相互影响。为清晰展示3个方面在交互设计中的内容和作用，构建了以技术、设计、实现价值为3个维度的三维体系架构（如图1所示）。

表1 近几年人机交互领域的总体研究趋势

研究趋势	介绍	具体研究目标
用户研究	关注用户的行为特征、需求和交互体验，并对用户体验进行评价	用户体验评价 用户行为预测 用户需求调查
交互设计	关注交互设计中存在的问题和缺陷，并探索相应的解决办法，以提高用户满意度	促进交互体验 研究新兴交互功能 交互界面设计 交互系统设计
智能产品	关注在设计大数据背景下，新兴智能产品的交互方式及相应的交互技术的开发，形成以用户为中心的交互系统	设计大数据 场景计算 以人为本
设计探索	关注设计人员或用户在新兴智能技术、设计方法和交互模式下，未来的设计发展趋势	协同创新设计 设计展望 新服务模式

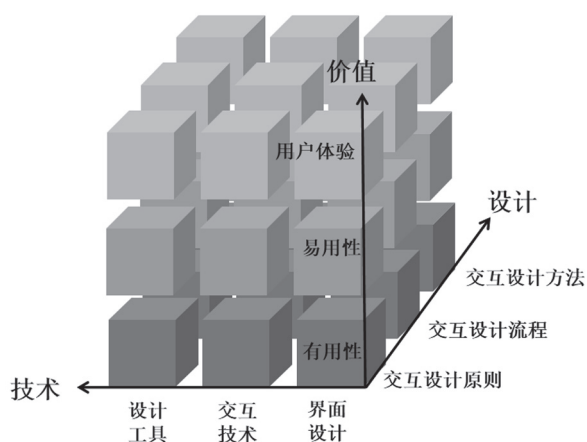


图1 人工智能产品人机交互设计体系架构模型

2.1 价值维度

价值维度主要是体现交互设计的目标，交互设计

的核心是在于满足用户需求。交互设计的目标有两个，即可用性目标和用户体验目标。Hartson等^[12]认为可用性包含两层含义，即有用性和易用性。结合美国著名心理学家马斯洛提出的人类需求5层次理论，按照产品设计思维将5个层次由低到高可归纳为，具有有用性、可靠性的底层设计，具有易用性、愉悦性的中层设计，最后是具有意义的顶层设计。人类需求的3个层级与交互设计目标的3个层级不谋而合。

（1）有用性。有用性是指产品具有一系列的基本功能，能满足用户的正常使用，主要表现为功能实用、性能可靠、安全有效。

（2）易用性。易用性是指交互效率高，产品易被用户快速学会使用，操作出错率低，操作方法易被用户记住，具有一定的性价比，用户对产品满意。

（3）用户体验。有学者认为交互设计就是关于创建新的用户体验的问题，这里的用户体验是指用户与产品交互时产生的一种纯主观的心理感受，关注的是用户对产品的情感价值、社会价值、共创价值等的整体评价，强调的是整个交互设计的总体性和系统性。

2.2 设计维度

设计维度从设计学的角度来阐述交互设计。目前已经形成了比较成熟的交互设计流程、方法和评价原则，这3个方面直接影响了交互设计过程和结果。

（1）交互设计原则。交互设计原则是关于行为、形式与内容的普遍适用法则，是众多经验和实践的总结，是基于设计师经验和价值观的一组准则，可以让刚接触交互设计的新手用最短的时间了解交互设计的重点。

（2）交互设计流程。一般人工智能产品的交互设计过程主要包括市场调研与设计研究、用户研究与任务分析、商业模型与概念设计、信息架构与设计实现、设计评估与用户测试、系统开发与运营跟踪。

（3）交互设计方法。交互设计从传统设计、可用性和工程领域中吸取了很多理论和技术，但交互设计不仅仅是这些学科的简单组合，已经形成了

自身独有的方法。很多设计师结合自身实践提出了以人为本的设计理念、以活动为中心的设计方法、以目标为导向的设计方法等。

2.3 技术维度

(1) 界面设计。交互界面是智能产品交互设计中的重要环节,人与智能产品之间的交互行为主要是通过交互界面发生的。所以,生产出来的智能产品能否俘获消费者芳心的关键在于交互界面设计。

(2) 交互技术。支撑交互行为和实现产品功能所需的技术,包括硬件和软件技术,主要有:图像和文字识别、多媒体、信息可视化、网络通信、传感器等。在以人为中心的理念中,人机交互技术会朝着更加自然、人性化的方向发展,通过多通道交互、虚拟现实、增强现实^[13]等技术,使用户能够通过多种感觉通道和动作通道,以非精确的方式与产品进行交互,使人们从传统的交互方式中解脱出来。

(3) 设计工具。交互设计师使用到的交互工具或编程有很多,多达30多种,这些工具是根据不同的任务开发的,主要用于绘制线框图、流程图、设计原型、演示等,部分工具和编程也被用于开发软件、建立网站、编写App应用等。

3 面向人工智能产品的人机交互设计标准化研究现状

有不少人认为设计属于创新性、个性化的行为,标准化工作属于规范化、一致性、限制性行为,两者之间存在矛盾,因此人机交互设计标准化工作的重点之一,就是划清标准化工作范围,只有恰当的处理好个性化与统一化的关系,才能通过规范设计行为为用户带来一致的界面样式、交互逻辑和品牌心智体验,起到用标准化促进创新活动发展的作用。

3.1 人机交互设计标准化必要性和可行性

人工智能产品井喷式出现在人们的日常生活中,人与智能产品的交互方式、交互界面、交互逻辑等多种多样,越来越多的学者注意到需要对人机交互设计进行标准化规划。对于人工智能产品研发企业而言,把设计规范制定成标准,给合作企业、产业链生态甚至整个行业使用,可以提高企业在行

业中的竞争力和话语权。对于用户而言,对人机交互过程进行标准化,培养同类产品的使用逻辑和惯性,可以降低用户使用产品时的学习时长,提高人机交互的效率和满意度,增强用户黏度。对于智能产品体系而言,人们越来越追求同一空间或生态下,智能产品之间的联合互通以提供更加高效的使用体验,因此需要标准化对智能产品体系进行规范,促进多种智能产品之间的数据共享和交流。

(1) 在人机交互术语名词界定方面

交互设计是一个交叉学科,该学科与其他学科存在演化、扩展、交叉等诸多繁杂的关系,导致目前人机交互领域中术语名词很多,所指代的范围会根据使用语境发生变化,交流沟通上存在一定障碍,急需制定关于人机交互术语方面的标准。例如:不同的公司,对交互设计师岗位设置的内容不尽相同,在交互设计相关的岗位招聘中,专职做交互设计的约占70%,其余交互设计岗位需求是设置在其他岗位中,其中界面设计开发和产品经理岗位占比最多^[14]。

(2) 在人机交互风格指南方面

界面风格指南是指一套相关预设计元素、图形的集合,其用途是保证不同部分工作的设计师或开发人员之间保持协调一致,并最终打造出核心化的体验。整个交互设计过程需要多方人员参与,为了保证参与人员不会过多地根据个人的喜好对工作内容进行修改、调整风格样式,需要在开发阶段,预先设定好设计风格,明确关键的设计元素,以便让开发人员能够直接或反复使用,提高工作效率^[15]。

(3) 在人机交互界面手势和按键设计方面

人们在常规电子产品的长期使用中,已经形成了一定的使用习惯,所以在使用类似产品时,用户比较倾向于保持原有操作,减少重新学习的时间成本。例如:经常使用的移动通信端产品,如:手机、平板电脑、儿童手表等,经常使用的截图、开关机、放大缩小图片、拖动软件等操作,再扩展到智能产品的显示屏操作等,如果能符合用户的操作习惯,会大大减少用户的重新学习时间,提高在不同产品之间切换的使用效率,增强用户对产品的使用黏度和频次^[16]。

3.2 国内外相关标准制定情况

对国内关于人机交互方面的国家标准、行业标准、地方标准和团体标准进行梳理,发现国内关于人机交互方面的标准主要集中在3个方面。(1)人机交互系统,主要集中在语音交互系统和视觉交互系统方面。(2)交互工效学,主要是人机交互和人与系统之间的交互。(3)具体产品的交互设计,该类标准主要是团体标准。国内人机交互标准制定情况见表2。

对国际人机交互相关标准进行梳理发现,国际标准主要是ISO/IEC1信息技术下设的SC7软件和系统工程、SC35用户界面,制定的ISO 2506X软件和系统工程系列标准;以及TC159下设的SC4人机工效学,制定的人机交互人类工效学相关标准,如:ISO 9241系列标准^[17]。

4 人机交互设计标准化的重要内容和方向

表2 国内人机交互标准制定情况

标准号	标准名称	标准类型
GB/Z 38623-2020	智能制造 人机交互系统 语义库技术要求	指导性技术文件
GB/T 36464-2018	信息技术 智能语音交互系统（系列标准）	国家标准
GB/T 18976-2003	以人为中心的交互系统设计过程	国家标准
GB/T 42396-2023	移动终端人-系统交互工效学 触控界面感知流畅性	国家标准
GB/T 18978-2021	人-系统交互工效学（系列标准）	国家标准
GB/T 21051-2007	人-系统交互工效学 支持以人为中心设计的可用性方法	国家标准
JT/T 1467-2023	载人潜水器舱室人机交互技术要求	行业标准
DL/T 1398.32-2014	智能家居系统 第3-2部分：智能交互终端技术规范	行业标准
T/CAQI 280-2022	家用空气调节器用户交互界面设计 第2部分：界面位置	团体标准
T/CAQI 279-2022	家用空气调节器用户交互界面设计 第1部分：总则	团体标准
T/CAB 0189-2022	智能家电语音识别交互设计指南	团体标准
T/KQP 4-2022	智能汽车车载语音交互系统性能要求及测试方法	团体标准
T/ZGCSC 002-2022	数字孪生城市软件人机交互技术总体要求	团体标准
T/ZSA 107-2022	虚拟现实视觉与交互相关用户体验评价体系	团体标准
T/CAQI 206-2021	厨房电器显控面板交互设计通则	团体标准
T/AHA 001-2021	支持语音和视觉交互的虚拟数字人技术规范	团体标准
T/SIOT 606-2021	智能语音与视觉交互软件接口要求	团体标准
T/CIDADS 00001-2020	家用电子产品人机交互元素及组件设计指南	团体标准
T/ZSA 16-2020	电梯智能语音交互系统技术规范	团体标准
T/CAQP 007-2019	智能直饮水处理装置交互服务规范	团体标准
T/CVIA 32-2014	人机交互技术规范	团体标准
T/TIAA 001-2012	车载信息服务 人机交互第1部分：图形符号	团体标准

表3 国际人机交互标准制定情况

标准号	标准名称	标准类型
ITU-T Z.323 SPANISH-1988	人机交互	ITU
ISO 9241	人机交互的人类工效学（系列标准）	ISO
ISO/IEC 25062-2006	软件工程 软件产品质量要求和评估 可用性试验报告的通用工业格式	ISO/IEC
ISO/IEC 25063-2014	系统和软件工程 系统和软件产品的质量要求和评价 可用性的行业通用格式：使用情境说明	ISO/IEC
ISO/IEC 25064-2013	系统和软件工程 软件产品质量要求和评价 可用的通用行业格式：用户需求报告	ISO/IEC
ISO/IEC 25065-2019	系统和软件工程 软件产品质量要求和评估 通用工业格式可用性：用户要求规范	ISO/IEC
ISO/TS 18152-2010	人机交互作用的人类工效学 人机相关问题工艺评定规范	ISO
ISO 9355-1-1999	显示和控制指示器设计的人类工效学要求 第1部分：显示和控制指示器人机交互	ISO
GSO ISO/TR 18529-2017	人机交互工效学以人为中心的生命周期过程描述	GSO
GSO ISO 9355-1-2016	显示器和控制执行器设计的人类工效学要求 第1部分：显示器和控制执行器的人机交互	GSO

通过调研发现,智能产品人机交互设计领域已经制定了一些基础类标准,但主要分布在人类工效、软件与信息工程、用户界面等领域,没有自己特有的标准体系。针对人机交互设计领域存在的问题,结合人机交互设计活动的全生命周期过程,研究提出了人机交互设计标准化的重点内容。人机交互设计标准化工作拟从术语、流程方法、原则等方面开展,以下将对各部分进行详细介绍。

4.1 人机交互设计术语

目前行业内对人机交互、人机交互设计、人机界面等名词没有统一明确的解释,为了便于使用,很多名词给出了广义和狭义两种解释,在日常交流中经常会因定义范围不清晰产生分歧^[18]。此外,由于人机交互与其他多种学科存在交叉关系,人机交互领域的术语很多是源于其他学科,但随着人机交互技术的发展,很多术语的定义已经不能很好地概括新兴的技术和产品。随着人工智能产品的多样化发展,涌现出了大量的新技术、新产品,需要对新名词予以明确的定义,进行规范化,推动行业的健康有序发展。

4.2 人机交互设计流程和方法

交互设计是一个多学科交叉的领域,在具体的实践操作中,既需要从商业、市场、用户的角度引导设计,也需要从架构、逻辑、技术上支持设计与开发,还需要从设计、信息整合与呈现、体验测试、视觉的角度去表达设计。虽然交互设计只是人工智能产品整体设计中的一部分,但是要考虑很多因素和环节,有必要对人工智能产品交互设计的流程和方法开展标准化工作,制定相关标准,固化设计过程中需要的必要流程和方法,提高设计效率,减少无效设计^[19]。

4.3 人机交互设计原则

人机交互涉及的范围很广,无论何种用途的人机交互设计,在设计过程中都应遵循一些基本要求,以确保设计出来的产品在满足用户基本需求的同时,带来愉悦的用户体验。

(1) 一致性。人机交互设计的一致性主要体现在两个方面:一方面是指同一显示界面应有一致的风格,如:信息显示的布局位置、逻辑规则、菜

单结构、色彩选择等呈现一致性,避免用户在理解上产生歧义或风格差异过大引起不适。另一方面是指同类产品显示的一致性,不同的界面元素有一套相应的标准格式,通过规范设计能够降低用户在同类产品中的学习成本。

(2) 易用性。菜单、导航、按钮、提示信息等需要具有易懂、易操作性,保证用户在不借助第三方解释和说明的情况下就可以对界面功能形成大致认识。此外,还应尽可能地减少操作步骤,降低认知负荷,使得用户能够专注于实际的任务而非被过多的信息所淹没,减少用户的记忆负担。

(3) 指导性。设计时应考虑用户在交互过程中可能遇到的各种问题,并提供充分的导引、提示信息,以便对用户进行指导,还应设置用户改错机制和随机退出机制。

(4) 容错性。在实际的使用中,要防止因操作失误给用户和产品带来损失,使得系统在因用户操作不当、环境状况紊乱等情况下导致的错误中,仍能呈现出稳定的交互环境^[20]。

5 结语

随着新兴交互技术的发展、界面范式的丰富、交互工具的增多,不断对人机交互设计提出更高的挑战和要求,在形式多变、竞争激烈的市场环境下,行业如何健康有序发展、科研院所如何能使研究成果快速占有市场、企业如何在产业生态链中占据有利位置、消费者如何获得满意的用户体验等,都可以通过标准化手段找到答案。在综合梳理国内外标准制定情况的基础上,发现国内制定人机交互标准的标准化组织主要集中在全国信息技术标准化技术委员会、全国人类工效学标准化技术委员会两个标准化组织,人机交互没有专业的标准化组织,这与人机交互专业的跨学科、跨领域特性相关。通过广泛调研,发现智能产品人机交互设计中有大量的标准化需求,在术语定义、流程方法、设计原则等方面急需制定相关标准。本文提出的人机交互设计领域标准化工作重点内容,为后期标准制定和行业发展提供参考。

参考文献

- [1] Shafique Kinza, Khawaja Bilal A, Sabir Farah, et al. Internet of things (Io T) for next-generation smart systems : a review of current challenges, future trends and prospects for emerging 5G-Io T scenarios[J]. IEEE Access, 2020(8): 23022-23040.
- [2] 王映霓. 基于用户体验的新能源汽车人机交互界面设计研究 [D]. 成都: 四川师范大学, 2022.
- [3] 罗仕鉴, 龚何波, 林伟. 智能产品交互设计研究现状与进展 [J]. 机械工程学报, 2023, 59 (11): 1-15.
- [4] 黄立, 何一, 马志骏, 等. 人机交互视角下的智能家居研究趋势分析 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2023, 35 (02): 165-184.
- [5] 张毅, 罗明伟, 罗元, 等. 基于脑电 α/β 波的智能轮椅人机交互 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41 (07): 109-114.
- [6] Tseng W J, Wang L Y, Chan L W. FaceWidgets: exploring tangible interaction on face with head-mounted displays[C]. The 32nd Annual ACM Symposium. 2019:417-427.
- [7] Chamunorwa M, Müller L-M, Ihmels T, et al. Sweet spot: displaying interaction areas on everyday home surfaces using AR[C]. Interactive Surfaces and Spaces. 2021:21-24.
- [8] Li S, Li CK, Li W, et al. Smartphone-sensors based activity recognition using IndRNN[C]. The 2018 ACM International Joint Conference and 2018 International Symposium. 2018: 1541-1547.
- [9] 许欢. 基于智能算法的适老化智能家居人机交互系统设计 [J]. 自动化与仪器仪表, 2022(12): 16-19.
- [10] 王沈策, 张奕宇, 朱彬彬. 面向老龄用户的农机产品人机交互设计 [J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2022, 37 (04): 57-65.
- [11] 曹祥哲. 人机工程学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2018.
- [12] Hartson H R, Andre T S, Williges R C. Criteria for evaluating usability evaluation methods[J]. International Journal of Human-computer Interaction, 2021, 13(4): 373-410.
- [13] Ye S N, Chu X T, Wu Y C. A survey on immersive visualization[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2021, 33(4): 497-507.
- [14] 单美贤. 人机交互设计 (第2版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2022.
- [15] 由芳, 王建民, 蔡泽佳. 交互设计: 设计思维与实践 2.0 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2020.
- [16] 王星元. 人机交互软件界面设计的重要性探讨 [J]. 美与时代(上), 2021 (05): 99-101.
- [17] Green P. ISO Human-Computer Interaction Standards: Finding Them and What They Contain[C]. Proceeding of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 2020, 64(1): 400-404.
- [18] Han T. Survey of multimodal user interface research[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2022(35): 154-156.
- [19] Gong C. Human-computer interaction: process and principles of human-computer interface design[C]. 2009 International Conference on Computer and Automation Engineering. 2009: 230-233.
- [20] Huang J, Han D, Chen Y, et al. A Survey on Human-Computer Interaction in Mixed Reality[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2016, 28(06): 869-880.