老龄智能轮椅可用性设计评价

——基于组合赋权的实证分析

陈 爱，王秋惠

（天津工业大学机械工程学院，天津 300387）

摘要：可用性研究对于产品优化迭代、改善使用体验具有重要作用。通过文本挖掘和文献分析获取感性需求，采用帕累托分析法归纳评价指标，使用模糊层次分析法、改进结构熵权法、博弈论计算主客观及组合权重，并对轮椅样本进行综合评价与产品改进和验证。确定影响老龄智能轮椅可用性设计的因素及优先级排序，验证模型有效性、应用性和稳健性，总结归纳可用性提升策略。研究结果为老龄智能轮椅创新设计及产业应用提供了理论与实践依据。

关键词：智能轮椅；可用性评价；模糊层次分析法；结构熵权法；模糊综合评价

中图分类号：TP242.6 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－1807(2026)05－0061－08

中国人口老龄化水平正在不断加深，老年人日常出行问题得到广泛关注[1]。智能轮椅通常服务于残疾人及年老体弱者，是其重要代步工具。智能轮椅有利于提高出行便捷性，促进老年人社会融入，但由于其技术复杂性和功能多样性，老年人在使用时容易出现学习困难、操作失误等可用性问题。

可用性是指产品在特定环境下为特定用户用于特定用途时所具有的效率、有效性和用户主观满意度[2]。从产品角度看，用户主观满意度直接影响产品的市场竞争力、迭代方向、品牌信任度、生命周期，以及商业价值转化。影响用户对智能轮椅主观满意度的因素有多种，如功能与老年人实际需求匹配程度、操作界面简洁程度、操作步骤复杂程度、技术安全感、老年人情感需求满足能力、学习与支持能力等。因此，解决可用性问题成为老龄智能轮椅设计和开发的关键。

近年来，国内外关于老龄智能轮椅可用性评价方面取得了显著进展，普遍以老年用户需求为核心构建评价维度。阚志刚和张婕[3]基于用户功能、安全保障及自主活动3大需求，搭建了定性评价指标体系，将可用性划分为可学习型、使用效率、可记忆性3个维度，但未解决指标权重分配与优先级排序问题。刘慧莹和辛凤[4]则从“用户体验”理论出发，聚焦交互界面，提出易于使用、易于记忆、易于学习、错误响应、用户满意5大设计原则，并将其应用至触摸屏界面开发，但该研究未测试验证原则的有效性，也缺乏相应设计方案的可用性量化评估。宋佳鑫[5]进一步拓展了评价维度的广度，通过分析智能轮椅老年用户需求，补充了易维护性、情感化、经济性等重要评价因素，涉及产品全生命周期。虽然其创新性引用模糊层次分析法对指标进行评价，但该方法依赖专家打分，结果较为主观。

Lee等[6]通过整合用户需求和专家意见，开发了包含安全性、操作性、效率和满意度4大评估评价维度的电动轮椅可用性量表，内容体系较为完善，但未涉及智能功能评价，难以直接迁移使用。Panchea等[7]以高校师生为研究对象，采用成熟的系统可用性量表(system usability scale，SUS)开展实证评价，发现智能轮椅产品处于“正常”评级，证明新手用户对该产品的可接受性。但该研究的用户范围偏离核心人群，忽视了老年用户及其使用特征，且整体可用性分数无法体现不同评价维度重要性差异，导致设计优化缺乏明显优先级。Chiang等[8]的研究代表了技术导向的评价路径，提出一种自适应共享控制策略，并通过凸分析这一客观量化方法确定共享控制权重，有效提升了智能轮椅辅助驾驶的安全性和可靠性。虽然该研究能够通过凸分析所得权重保证“系统稳定”，但未考虑老年用户主观

收稿日期：2025-09-07

基金项目：教育部人文社科规划基金(19YJAZH093)

作者简介：陈爱(1998—)，女，河北张家口人，硕士研究生，研究方向为老年智能服务机器人；通信作者王秋惠(1969—)，女，山东潍坊人，博士，教授，研究方向为智能人因学、设计人因学、老龄人因学以及老龄服务机器人。

接受度，由于控制权突然被接管而产生的恐慌，可能会导致主观可用性评价降低。

综合国内外研究可知，当前老龄智能轮椅可用性评价存在 3 大缺口：①评价维度不全，缺乏涵盖“安全-功能-交互-情感”的全维度框架；②主客观评价失衡，或倾向于一种评价方法，或依赖于技术参数，尚未形成多种方法融合的评价体系，缺少权重平衡与优先级排序；③“体系构建-优化验证”闭环存在断裂，评价结果难以有效反哺设计迭代。这些缺口导致评价与老年用户真实需求脱节，制约了产品落地与产业升级。针对上述问题，现主要从3 个方面开展研究：①融合“安全-功能-交互-情感”，建立基于感性需求的老龄智能轮椅可用性设计评价体系；②构建一套融合主观、客观的组合赋权评价模型，实现需求优先级与指标的科学量化，作为指导设计改进的基础；③将可用性评价嵌入“需求收集-指标转化-权重求解-体系应用-改进验证”全流程，形成闭环优化机制，从而为老龄智能轮椅产品创新设计、科学评估与产业应用提供理论支撑与实践路径。

1　感性需求获取与筛选

在线评论分析是洞悉用户需求的重要方式，可在一定程度上弥补传统设计开发过程中的用研不足[9]。借助 Python 爬虫，获取 2023 年 1 月 1 日至 2025 年 3 月 24 日京东平台上 31 款智能轮椅商品 7 450 条评价内容。经文本清洗、jieba 分词处理、词频统计，获得 100 个高频评价词，如图 1 所示。采用亲和图法，通过提取、合并，初步收集感性需求词汇 35 个，另通过检索查阅智能轮椅设计相关文献资料，获得 154 个感性需求词。

为避免语意重叠或语意模糊，对部分相近词汇进行合并与分类，以保证指标体系的精炼性和区分度，初步筛选得到 69 个感性词汇。邀请 9 名有老年产品相关研究经验的硕士研究生、2 名医护人员、2 名企业产品设计师和 8 位老年用户组成感性词汇研究小组，从外观、操作、感知 3 个角度对以上 69 个词汇进行关联性评价。使用帕累托分析法（ABC 分类法），再次筛选评价指标，将累计频数百分比在 0%～70%的 27 个感性需求词汇纳入指标池，见表 1。

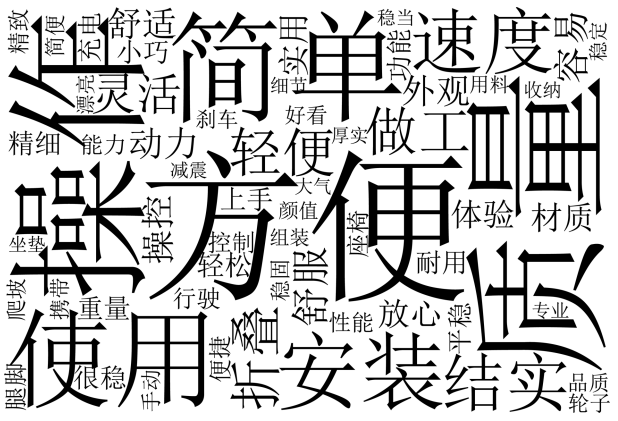


图 1　智能轮椅感性评价词云图

针对 27 个指标，尽管部分相关性较高，如“易操作的”和“简单的”、“方便的”和“便携的”，但从老年人使用体验的完整性、词汇的多义性和语境依赖性出发，保留多对相关指标。

表 1　感性需求词汇

序号	词汇	序号	词汇	序号	词汇
1	易操作的	10	安全的	19	可控的
2	舒服的	11	易用的	20	智能的
3	简洁的	12	牢固的	21	便携的
4	方便的	13	易学的	22	实用的
5	平稳的	14	保护的	23	人性化的
6	可靠的	15	安心的	24	预警的
7	结实耐用的	16	符合人机的	25	可调节的
8	简约的	17	有质感的	26	协调的
9	简单的	18	美观的	27	多功能的

2　可用性评价体系构建

采用亲和图法和德尔菲法，层次化分析 27 个指标，确定美观性、易用性、安全性、可靠性等 7 个一级可用性评价指标，以及对应二级指标。其中，美观性指造型、色彩、材质搭配的视觉吸引力与艺术性；易用性指用户操作轮椅的简便程度；可靠性指物理结构和系统稳定，具备关键功能运行能力；易学性指老人无须复杂学习或专业指导，即可快速理解并掌握核心功能与操控逻辑的能力；安全性指轮椅的主被动安全保护能力；实用性指轮椅解决实际生活问题的能力；舒适性指轮椅操作及设计带给用户的身体感受与心理舒适度。采用层次分析法（analytic hierarchy process，AHP）建立老龄智能轮椅可用性设计评价指标体系，见表 2。

2.1　基于模糊层次分析法的主观权重赋值

感性词汇主要反映用户主观感受，具有模糊性，而传统层次分析法在成对比较时以绝对值表示，不符合主观判断不精确和模糊性的特征[10]。模糊层次分析法（fuzzy analytic hierarchy process，FAHP）集成了传统层次分析法和模糊数学的优点，更为简洁、客观[11]，能够综合专家判断并通过一致性

表 2　可用性设计评价指标体系

总指标	一级指标	二级指标	指标定义
老龄智能轮椅可用性	美观性	有质感的	材料与工艺的品质感
		简约的	外观设计的简洁性
		协调的	设计元素的整体性
	易用性	方便的	操控路径和功能调用的便捷性
		易操作的	操控方式的简易程度
		智能的	系统的主动辅助能力
	可靠性	牢固的	结构工艺的稳固性
		耐用的	材质与结构的寿命
	易学性	简单的	基础操作快速掌握
		简洁的	交互界面直观易懂
	安全性	保护的	必要的被动防护
		安心的	使用时的心理安全感
		预警的	安全风险的预提示
		可控的	危险情况处理机制
	实用性	可调节的	功能参数的个性化适配
		便携的	收纳与运输的便捷性
		多功能的	功能丰富性及多场景适配性
	舒适性	平稳的	动态和静态稳定性
		人性化的	细节设计的情感关怀
		符合人机的	人与轮椅的生理适配性

检验保证可靠性,适合多指标、多专家评价情境,其具体步骤如下。

(1)邀请行业专家,采用 0.1～0.9 标度法对 n 个指标的重要性进行两两比较,见表 3,构建得到 $n\times n$ 的模糊互补判断矩阵。

(2)采用公式法计算模糊矩阵指标 c_i 的权重 w_i,其计算表达式为

$$w_i=\frac{\sum_{i,j=1}^{n}c_{ij}+\frac{n}{2}-1}{n(n-1)} \tag{1}$$

式中:$i,j=1,2,\cdots,n$。

(3)为判断权重值的合理性,使用判断矩阵的相容性指标 $I(\boldsymbol{D},\boldsymbol{E})$ 和特征矩阵 $\boldsymbol{W}^*$ 对比较判断过程进行一致性检验。

$$I(\boldsymbol{D},\boldsymbol{E})=\frac{1}{n^2}\sum_{i,j=1}^{n}|a_{ij}+b_{ji}-1| \tag{2}$$

$$\boldsymbol{D}=(a_{ij})_{n\times n} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{E}=(b_{ij})_{n\times n} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{W}^*=(W_{ij})_{n\times n} \tag{5}$$

$$w_{ij}=\frac{w_i}{w_i+w_j} \tag{6}$$

式中:$i,j=1,2,\cdots,n$;矩阵 $\boldsymbol{D}$ 与 $\boldsymbol{E}$ 均为模糊判断矩阵;a_{ij}、b_{ij} 均为模糊判断矩阵的元素;$I(\boldsymbol{D},\boldsymbol{E})$ 为 $\boldsymbol{D}$ 和 $\boldsymbol{E}$ 的相容性指标;$\boldsymbol{W}^*$ 为模糊判断矩阵的特征矩阵;w_{ij} 为特征矩阵的元素。若 $I(\boldsymbol{D},\boldsymbol{E})<\alpha$(一般取 $\alpha=0.1$),则可认为判断矩阵为满意一致矩阵,一致性检验通过。

表 3　模糊互补判断矩阵标度

标度	含义	说明
0.5	同等重要	两因素相比较,同等重要
0.6	稍微重要	两因素相比较,一因素比另一因素稍微重要
0.7	明显重要	两因素相比较,一因素比另一因素明显重要
0.8	重要得多	两因素相比较,一因素比另一因素重要得多
0.9	极端重要	两因素相比较,一因素比另一因素极端重要
0.1～0.4	反比较	若因素 c_i 与因素 c_j 相比较,得到的判断为 c_{ij},则因素 c_j 与因素 c_i 相比较得到的判断为 $c_{ji}=1-c_{ij}$

2.2　基于改进结构熵权法的客观权重赋值

结构熵权法(structure entropy weight method, SEWM)是一种客观赋权法,结合了德尔菲专家调查法与模糊分析法[12],改进的结构熵权法进一步剔除了原方法存在的认知不确定性[13],对主观赋权过程进行了修正[14]。采用改进的结构熵权法,计算老龄智能轮椅各层级指标权重。详细步骤如下。

(1)根据德尔菲专家调查法原理,邀请 k 名对评测指标熟悉、具有专业权威性、评价公正的专家,独立地对 n 个指标进行排序,形成典型排序矩阵。

(2)对典型排序矩阵进行盲度分析。根据专家典型排序,确定排序转化的隶属函数,进一步计算不确定性 h_{ij}、平均认识度 $1-h_j$、认识盲度 Q_j,以及第 i 个专家对指标 u_j 的整体认识度 x_j。

$$Q_j=\max(h_{1j},h_{2j},\cdots,h_{kj}) \tag{7}$$

$$x_j=(1-h_j)(1-Q_j) \tag{8}$$

(3)对 x_j 进行归一化处理,得到指标 u_j 的权重值 W_j。

$$W_j=\frac{x_j}{\sum_{j=1}^{n}x_j} \tag{9}$$

2.3　基于博弈论的组合权重赋值

博弈论(game theory, GM)原理能够将主观权重与客观权重线性组合,从而实现主客观权重分配的优化。主要计算步骤如下。

(1)构建权重向量的线性组合公式。

$$\boldsymbol{W}_Z^{\mathrm{T}}=\beta_1\boldsymbol{W}_1^{\mathrm{T}}+\beta_2\boldsymbol{W}_2^{\mathrm{T}} \tag{10}$$

式中:$\boldsymbol{W}_Z^{\mathrm{T}}$ 为组合权重向量;$\boldsymbol{W}_1^{\mathrm{T}}$ 为主观权重向量;$\boldsymbol{W}_2^{\mathrm{T}}$ 为客观权重向量;β_1 和 β_2 为线性组合系数。

(2)确立目标函数,使 $\boldsymbol{W}_Z^{\mathrm{T}}$ 与 $\boldsymbol{W}_1^{\mathrm{T}}$ 和 $\boldsymbol{W}_2^{\mathrm{T}}$ 的离差最小化。基于矩阵微分性质,计算最优化一阶导数条件,将其转化为等价线性方程组:

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{W}_1\boldsymbol{W}_1^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{W}_1\boldsymbol{W}_2^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{W}_2\boldsymbol{W}_1^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{W}_2\boldsymbol{W}_2^{\mathrm{T}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\beta_1\\ \beta_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{W}_1\boldsymbol{W}_1^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{W}_2\boldsymbol{W}_2^{\mathrm{T}}\end{bmatrix} \tag{11}$$

(3)计算组合系数 β_1 和 β_2，对系数进行归一化处理：

$$\beta_d^* = \frac{|\beta_d|}{\sum_{d=1}^{2}|\beta_d|} \tag{12}$$

式中：$d=1,2$。

(4)由归一化后的组合系数，求得最终组合权重向量：

$$\boldsymbol{W}_Z^{\mathrm{T}} = \beta_1^* \boldsymbol{W}_1^{\mathrm{T}} + \beta_2^* \boldsymbol{W}_2^{\mathrm{T}} \tag{13}$$

2.4　模糊综合评价

模糊综合评价法(fuzzy comprehensive evaluation，FCE)具有主观性特征，多用于评估指标模型和设计方案的有效性。采用该方法对老龄智能轮椅可用性设计效果评价步骤如下。

(1)基于评价指标，构建因素集 G，$G=\{g_1,g_2,\cdots,g_n\}$。

(2)设定每一个评价决策构成评语集 L，$L=\{l_1,l_2,\cdots,l_m\}$。

(3)根据因素集和评语集，统计评价结果，构建隶属度矩阵 $\boldsymbol{R}$。

(4)设定因素集中每个指标的权重值作为权重向量 $\boldsymbol{M}$，则 $\boldsymbol{M}=(m_1,m_2,\cdots,m_n)$。

(5)由指标权重向量和隶属度矩阵，合成得到模糊综合评定向量 $\boldsymbol{B}=\{b_1,b_2,\cdots,b_n\}$，计算公式为

$$\boldsymbol{B}=\boldsymbol{MR} \tag{14}$$

(6)设综合评价得分为 F，每个评语等级所对应的得分向量记为 $\boldsymbol{S}=(s_1,s_2,\cdots,s_m)$，则综合得分计算公式如下：

$$F=\boldsymbol{SB}^{\mathrm{T}} \tag{15}$$

3　实例应用

3.1　组合权重求解

3.1.1　主客观权重求解

邀请 10 名具有老年产品研究和设计经验的专家，采用德尔菲法，依据 0.1～0.9 标度对指标重要性两两比较打分。取所有专家指标评分的算术平均值，构建一个多专家决策模糊判断矩阵。由式(1)和式(5)、式(6)，计算得到各级指标主观权重。为保证主观权重分配过程的专家内部一致性，对各层级模糊判断矩阵进行一致性检验。结果显示，各级矩阵均满足相容性指标的阈值要求(相容性指标＜0.1)，表明一致性良好，指标权重分配可靠，见表 4。

为保证两份问卷中专家意见一致性，将这 10 位专家对指标的重要性进行排序。计算得到一级指标与二级指标的客观权重，见表 5。

表 4　FAHP 一致性检验结果

层级	相容性指标大小	是否通过
总体(一级)	0.054 6	是
美观性(二级)	0.023 1	是
易用性(二级)	0.045 9	是
可靠性(二级)	0.022 5	是
易学性(二级)	0	是
安全性(二级)	0.024 5	是
实用性(二级)	0.030 7	是
舒适性(二级)	0.053 4	是

表 5　可用性评价指标主客观权重

一级指标	主观权重	客观权重	二级指标	主观权重	客观权重
美观性	0.121 0	0.111 9	有质感的	0.306 7	0.309 6
			简约的	0.343 3	0.339 7
			协调的	0.350 0	0.350 7
易用性	0.144 0	0.128 8	方便的	0.338 3	0.304 6
			易操作的	0.371 7	0.425 9
			智能的	0.290 0	0.269 5
可靠性	0.153 3	0.163 7	牢固的	0.545 0	0.538 7
			耐用的	0.455 0	0.461 3
易学性	0.137 4	0.119 9	简单的	0.500 0	0.529 6
			简洁的	0.500 0	0.470 4
安全性	0.158 6	0.204 3	保护的	0.270 0	0.266 0
			安心的	0.237 5	0.240 7
			预警的	0.242 5	0.240 7
			可控的	0.250 0	0.252 7
实用性	0.148 8	0.151 8	可调节的	0.361 7	0.397 7
			便携的	0.325 0	0.316 1
			多功能的	0.313 3	0.286 2
舒适性	0.136 9	0.119 6	平稳的	0.341 7	0.344 5
			人性化的	0.283 3	0.278 4
			符合人机的	0.375 0	0.377 1

3.1.2　组合权重求解

基于博弈论，由一级指标和二级指标的主客观权重向量，求解得到归一化组合系数。由式(13)求解最终组合权重。归一化处理后的综合权重结果见表 6。

根据一级指标组合权重可知，其重要度排序为安全性＞可靠性＞实用性＞易用性＞易学性＞舒适性＞美观性，说明安全性是影响智能轮椅可用性的首要因素，可靠性与实用性是重要因素，而美观性的影响作用较弱。

根据综合排序结果可知，二级指标前 10 为牢固的＞耐用的＞简单的＞可调节的＞简洁的＞易操作的＞保护的＞可控的＞便携的＞预警的，这些指标集中分布在可靠性、易学性和安全性维度，是提升老龄智能轮椅可用性的重要着手点。

将 3 种不同赋权方法所得指标权重值进行比较，结果如图 2 所示。对比发现，通过博弈论计算得

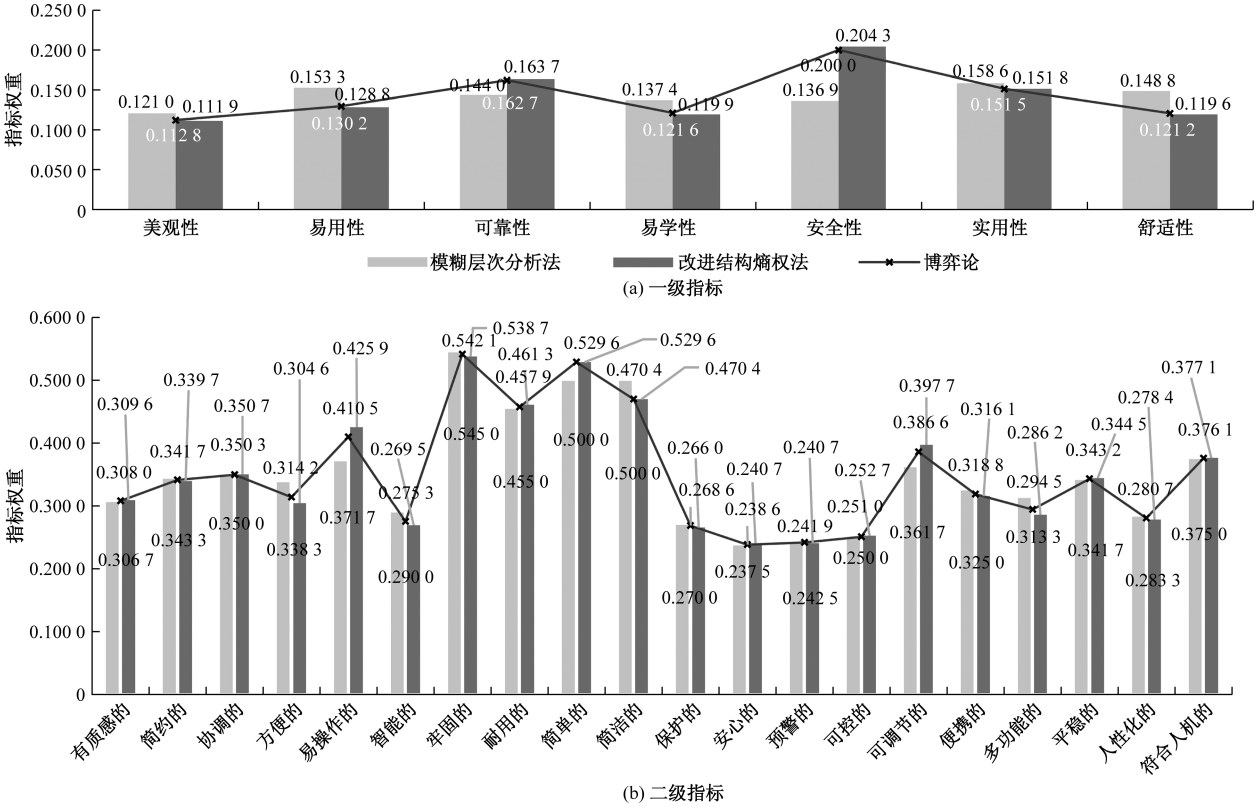


图 2　不同赋权方式权重对比

表 6　可用性评价指标综合权重

一级指标	组合权重	二级指标	组合权重	综合权重	综合排序
美观性	0.112 8	有质感的	0.308 0	0.034 9	19
		简约的	0.341 7	0.038 5	17
		协调的	0.350 3	0.039 5	16
易用性	0.130 2	方便的	0.314 2	0.040 9	15
		易操作的	0.410 5	0.053 5	7
		智能的	0.275 3	0.035 9	18
可靠性	0.162 7	牢固的	0.542 1	0.088 2	1
		耐用的	0.457 9	0.074 5	2
易学性	0.121 6	简单的	0.529 6	0.064 4	3
		简洁的	0.470 4	0.057 2	5
安全性	0.200 0	保护的	0.268 6	0.053 7	6
		安心的	0.238 6	0.047 7	11
		预警的	0.241 9	0.048 4	9
		可控的	0.251 0	0.050 2	8
实用性	0.151 5	可调节的	0.386 6	0.058 6	4
		便携的	0.318 8	0.048 3	10
		多功能的	0.294 5	0.044 6	13
舒适性	0.121 2	平稳的	0.343 2	0.041 6	14
		人性化的	0.280 7	0.034 0	20
		符合人机的	0.376 1	0.045 6	12

到的组合权重,能够较好地平衡模糊层次分析法的主观性和改进结构熵权法的专家意见差异性,进一步优化了权重计算过程,使指标权重趋于稳定。

3.2　综合评价

3.2.1　模型适用性

通过第 2 节的评价指标体系,构建模糊综合评价因素集 G。设定五级评语,依次为差、较差、一般、较好、好,分别赋值 30、50、70、85、100。对各等级的前后赋值求取平均值,作为等级划分分割点,对应评价等级区间分别为[0,40)、[40,60)、[60,77.5)、[77.5,92.5)、[92.5,100]。

基于目标人群(老年康复用户、长期残障用户、短期出行用户)、功能类别(手动、电动、智能)、外观差异(传统、现代、高科技),在京东电商平台上选择 9 款代表性轮椅样本,按功能类别依次标记为 S1～S3、D1～D3、Z1～Z3,用 Photoshop 软件统一隐去品牌商标信息,如图 3 所示。

邀请 6 位设计人员运用模糊综合评价法对 9 个样本 20 个指标评价打分,计算结果见表 7。根据模糊综合评价分值与评价等级区间对应关系,可知轮椅样本 Z1、Z2、Z3 的可用性设计“较好”,样本 S2、S3、D1、D2、D3 的可用性设计“一般”,而样本 S1 则被认为“较差”。通过比较发现,在手动轮椅组中,样本 S2 的可用性设计最优;在电动轮椅组中,样本 D3 的可用性设计最优;在智能轮椅组中,样本 Z3 的



图 3　老龄智能轮椅评价样本

表 7　各轮椅样本可用性综合评价结果

样本	总分	组内排序	综合排序
S1	59.164 9	3	9
S2	63.653 9	1	7
S3	62.742 3	2	8
D1	70.510 4	2	5
D2	70.099 0	3	6
D3	71.000 4	1	4
Z1	79.998 0	2	2
Z2	77.827 0	3	3
Z3	83.831 3	1	1

可用性设计最优。此外，各功能类别轮椅样本之间的分数差值较大，说明可用性评价模型能够较好体现各轮椅样本差异，适应于不同类别轮椅的可用性评价。

比较一级指标评价结果发现，对于美观性，样本 S1 表现最差，Z3 表现最优；对于易用性，样本 S2 表现最差，Z3 表现最优；对于可靠性，样本 S1 表现最差，Z2 表现最优；对于易学性，样本 S1、S2、S3 表现相同，为最差，Z1 表现最优；对于安全性，样本 S3 表现最差，Z3 表现最优；对于实用性，样本 S1 表现最差，D1 表现最优；对于舒适性，样本 S1 表现最差，Z3 表现最优。借此，有助于进一步明晰智能轮椅产品的可用性层次差距，使智能轮椅可用性设计的完善更具有针对性。

3.2.2　模型稳健性

为检验评价模型的稳健性，在保持评价数据不变的情况下，对以上 9 款轮椅模糊综合评价结果进行敏感性分析。选择关键一级指标“安全性”的权重作为扰动项，分别进行±10%、±20%的扰动，使用归一化后的权重重新计算各样本综合评价得分，并计算排序差值。

表 8 显示，在±10%的权重调整情况下，电动轮椅样本 D1、D2、D3 的排序发生了±1 位的变化，但综合评价结果基本保持不变，表明模型在正常波动下仍能保持稳定。表 9 显示，在进行±20%的极端扰动后，有 5 个样本的排名发生了±1 位的变化。尽管出现轻微波动，但各样本评价结果基本保持稳定，整体排序格局未出现高低位次的颠倒，表明模型在合理范围内对核心指标具有一定敏感性，但并不会导致评价结果的根本性变化。

表 8　±10%权重扰动结果

样本	+10%		−10%	
	得分	Δrank	得分	Δrank
S1	59.302 7	0	58.204 4	0
S2	63.681 1	0	62.781 2	0
S3	62.194 7	0	62.434 9	0
D1	69.835 0	−1	70.350 3	1
D2	70.524 6	1	68.659 3	0
D3	71.000 4	0	70.080 8	−1
Z1	80.076 1	0	78.928 8	0
Z2	78.112 6	0	76.425 5	0
Z3	84.665 0	0	81.696 6	0

表 9　±20%权重扰动结果

样本	+20%		−20%	
	得分	Δrank	得分	Δrank
S1	59.428 7	0	58.776 6	0
S2	63.716 6	0	63.568 1	−1
S3	61.750 0	0	64.239 0	1
D1	69.286 0	−1	72.355 9	1
D2	70.893 0	1	68.915 6	0
D3	71.013 0	0	70.990 0	−1
Z1	80.155 9	0	79.768 4	0
Z2	78.362 7	0	77.033 1	0
Z3	85.374 3	0	81.524 2	0

3.3　产品改进及再评估

3.3.1　确定改进方向

基于 3.2 节综合评价结果，同时考虑到研究核心为“智能轮椅”，确定综合评价接近“一般”、智能指标评分较低的样本 Z1 作为改进对象。该样本在“安全性”“可靠性”和“实用性”关键指标上表现不佳，权重高但评分低，具有较大的改进空间与代表性。通过收集智能轮椅 Z1 在关键指标方面的用户负面反馈，提出针对性设计改进方案，见表 10。

3.3.2　验证改进效果

为验证改进方案的有效性，并确保评估的客观性，重新招募 8 名工业设计师与工程师，采用以上相同流程、方法和测评量表进行再评估。对比发现（表 11），改进后的智能轮椅 Z1 在安全性、可靠性和

表 10　智能轮椅 Z1 关键指标设计改进方案

评价指标		用户负面反馈	设计改进方案
安全性	保护的	手指乏力,解不开卡扣安全带 扶手容易上翻无法固定	1. 改为按压特殊按钮快速释放安全带 2. 增加电动锁定功能,通过操作面板控制
	安心的	无法查看老人去向	加装 GPS(全球定位系统)定位模块和智能终端,支持远程查看位置
	预警的	倒车提示音小看不到身后道路情况	1. 更换大功率、高响度提示音喇叭,且声音辨识度高 2. 安装可调节角度的凸面后视镜
可靠性	耐用的	电量到 45%左右下降加快	1. 采用高容量、低衰减电池 2. 优化电池管理系统,精准控制电池放电速率
实用性	可调节的	前轮太灵活掌握方向吃力	增加前轮的转向阻尼
	便携的	折叠装车时容易翻起散架	增加折叠锁定机构

表 11　改进前后关键指标得分对比

评价指标	改进前	改进后	提升幅度/%
安全性	80.95	92.60	14
可靠性	80.42	89.29	11
实用性	75.30	89.81	19
保护的	82.50	98.13	19
安心的	73.33	94.38	29
预警的	82.50	90.63	10
耐用的	75.00	94.38	26
可调节的	69.17	86.88	26
便携的	69.17	94.38	36

实用性等维度得分均得到提升,综合可用性评分提高了 11%,结果验证了模型评价结果指导设计改进和提升产品体验的有效性。配对样本 T 检验结果显示,得分提升显著,具有统计学意义($t=-8.209$,$P<0.001$),进一步证明设计改进的有效性和模型的应用价值。

4　可用性提升策略

(1)安全性。综合考虑老年用户-智能轮椅-行驶环境为一体的内外部因素,在行驶前后,依据老年用户使用习惯加强轮椅稳定性设计,确保站立与乘坐动作之间的安全过渡。在行驶过程中,加强物理防护设计,增强智能轮椅安全风险的预警与提示功能,完善危险处理机制,确保用户及辅助人员面对突发情况能够及时进行手动干预、危险求救。另外,提供速度限制、刹车冗余机制等,提升用户心理安全感。

(2)可靠性。在满足国家智能轮椅相关安全测试标准的基础上,使用高强度材质,结合工艺升级、物理防护、结构创新等方式,提升智能轮椅车架结构稳固性与承重能力。选用耐候性强材料以改善防水、防锈、防磨损性能,同时选择较为耐用的电机与电池,以延长车体使用寿命。

(3)实用性。增强行驶速度、照明亮度、转向灵敏度等性能与整车关键部件的灵活调节能力,个性化适配不同用户喜好与体型差异。通过预留拓展接口丰富智能轮椅功能,满足老龄用户日常场景需要。针对出行便捷性,支持快速折叠、部件拆卸、轻松收纳、拖拽移动,方便搬运或乘坐公共交通。

(4)易用性。减少操作步骤,优化操作流程,将复杂功能整合为“一键模式”,重要操作部件则布置在老年用户坐、立姿容易用手触及的位置。加强适老化设计,一方面,通过免弯腰折叠、充电等功能避免老人大幅度动作,强化“免弯腰+”功能在不同场景的适配能力,另一方面,按键设计适应老人手部尺寸与用力特征,同时增加触觉反馈,增加操控灵敏性。此外,提升系统主动辅助能力,增强自动避障、语音操控、路径规划、人物跟随等功能,丰富智能场景,创造智能新体验,满足不同体能、不同学历背景老人的需求。

(5)易学性。优化控制操作和界面设计,降低老年人记忆和操作难度。一方面,提供操作引导灯或语音提示,指导新用户快速上手,通过控制选择路径,限制选择机会,减少学习负荷;另一方面,增加交互界面直观性,采用图标+颜色编码/简短文字的呈现方式,避免信息过载。同时,图标设计具备基本命令特征,不复杂,容易被老人识别并解读。

(6)舒适性。优化减震系统、结构设计与重心设计,确保行驶过程的动态稳定性。通过细节设计增强舒适性,体现情感关怀,如坐垫易清洗、USB 充电口设计、面料具备亲肤性与保暖性、行驶噪声低等。头枕、靠背、扶手、座面、脚踏板等部件尺寸的设计需要符合最新老年人人体尺寸要求;座椅依据老龄人体压力分布进行设计;靠背形状贴合人体背部曲线,以此降低乘坐过程中的疲劳感。

(7)美观性。提升材料档次和工艺增加智能轮椅品质感,产品配色贴合老年人审美需求,降低智能轮椅医疗外观属性,使之日常化。简化外观线条,减少复杂按钮,采用一体化设计、隐藏式设计,以及简洁几何形态降低视觉复杂度。另外,确保智能轮椅部件设计元素的一致性和协调性,提升整体观感。

5 结论

可用性设计在提高用户使用体验、提升产品满意度和购买意愿方面起着重要作用。将感性需求转化为评价指标，符合用户视角的定性评价方式，能够更加贴合用户在实际购买和使用过程中的主观情绪。通过博弈论，对模糊层次分析法和改进结构熵权法所得主客观权重进行组合赋权，有利于避免单一方法导致的偏向性，使权重结果更加可靠稳定。基于组合赋权与模糊综合评价的老龄智能轮椅可用性设计评价模型，可有效区分不同轮椅类别，判定产品可用性设计现状，并通过综合评价得分、各指标得分，定位产品可用性问题，指出设计改进方向。该评价模型可融入智能轮椅设计开发、可用性与功能测试、产品改进与验证环节，有助于产品迭代升级，增强行业竞争力。此外，企业在设计开发老龄智能轮椅产品时，应当重视可用性设计，基于用户生理、心理与认知特征，从安全性、可靠性、实用性、易用性、易学性、舒适性、美观性各维度提升用户的主观满意度。

需要注意的是，由于感性指标的模糊性特点，且部分指标具备多重含义，可能会对评价者造成理解困难，影响评价结果的准确性。另外，考虑到篇幅问题，有关权重计算的详细过程描述有限，未来的研究将针对这些内容进行改进及完善。

参考文献

[1] 刘厚莲. 中国式现代化进程中人口结构变动的影响与应对[J]. 中共中央党校(国家行政学院)学报，2024，28(5)：129-139.

[2] Ergonomics of Human-System Interaction Committee. Ergonomics of human-system interaction- Part 11：usability：definitions and concepts：ISO 9241-11-2018[S]. Geneva：International Organization for Standardization，2018.

[3] 阚志刚，张婕. 可用性指标在老年人智能轮椅中的应用[J]. 大众标准化，2024(4)：139-141.

[4] 刘慧莹，辛凤. 面向老年的智能轮椅触摸屏交互界面设计研究[J]. 科技创新与应用，2023，13(19)：37-42.

[5] 宋佳鑫. 基于用户体验的老年人智能轮椅设计研究[D]. 南昌：南昌大学，2024.

[6] LEE B S，LEE J A，CHOI H，et al. Development of the usability scale for power wheelchairs and its application in power wheelchairs users in Korea[J]. Journal of Mechanics in Medicine and Biology，2020，20(10)：2040031.

[7] PANCHEA A M，TODAM NGUEPNANG N，KAIRY D，et al. Usability evaluation of the smart wheeler through qualitative and quantitative studies[J]. Sensors，2022，22(15)：5627.

[8] CHIANG H H，YOU W T，LEE J S. Shared driving assistance design considering human error protection for intelligent electric wheelchairs[J]. Energies，2023，16(6)：2583.

[9] 胡康，计开禹. 基于在线评论分析法的童车产品优化设计研究[J]. 设计，2024，37(4)：105-109.

[10] 王会娟，戴媛媛，曲双石. 生活环境感知评价体系的构建及实证分析[J]. 数学的实践与认识，2014，44(10)：89-97.

[11] 翟运开，周帆，张坤. 移动健康应用隐私安全评价体系的构建与实证研究[J]. 图书情报工作，2024，68(14)：3-13.

[12] 程启月. 评测指标权重确定的结构熵权法[J]. 系统工程理论与实践，2010，30(7)：1225-1228.

[13] 肖枝洪，王一超. 关于“评测指标权重确定的结构熵权法”的注记[J]. 运筹与管理，2020，29(6)：145-149.

[14] 吴开兴，赵洪林，施丽君. 基于综合指标评价的起重机选型研究[J]. 山西建筑，2021，47(17)：160-162.

Evaluation of Usability Design in Smart Wheelchairs for Elderly：An Empirical Analysis Based on Combined Weighting

CHEN Ai，WANG Qiuhui

(School of Mechanical Engineering，Tiangong University，Tianjin 300387，China)

Abstract：Usability studies play an important role in product optimization，iteration，and improving the user experience. Perceived needs were identified through text mining and literature analysis，and evaluation indicators were derived using the Pareto method. The fuzzy analytic hierarchy process，an improved structural entropy weighting approach，and game theory were applied to determine subjective，objective，and integrated indicator weights. A comprehensive evaluation of the wheelchair samples was then conducted for product improvement and validation. The factors influencing the usability design of smart wheelchairs for the elderly and their priority ranking was determined. The effectiveness，applicability，and robustness of the proposed model are verified，and strategies for improving usability are outlined. These findings provide both theoretical insights and practical guidance for the innovative design and industrial application of smart wheelchairs for the elderly.

Keywords：smart wheelchair；usability evaluation；fuzzy analytic hierarchy process；structural entropy weight method；fuzzy comprehensive evaluation