

基于 AHP-FCE 的康复训练仪设计

李静, 王依晨, 朱子源, 祖江颖

(燕山大学, 秦皇岛 066004)

摘要: **目的** 为了提高中风和脑损伤患者在康复训练过程中的效率, 对康复训练仪的设计做了一系列目标优化。**方法** 使用层次分析法 (AHP) 以及模糊综合评价 (FCE) 的方法, 建立针对于康复训练仪的设计评价模型, 围绕康复训练仪设计评价和方案决策两方面进行了研究。在设计评价方面, 将康复训练仪的设计拆解成为不同的层次、不同的要素, 采用定性和定量相结合的分析方法, 计算并排序每个设计要素的权重。在方案决策方面, 依据上阶段计算出的各要素权重值排序, 运用模糊综合评价法对康复训练仪的设计方案进行评分, 得到最完善、最优型的设计方案。**结论** 通过引入层次分析法和模糊综合评价在前期设计过程中的应用, 能够有效地避免产品设计中的主观因素, 为设计决策以及设计评价提供客观依据。

关键词: 康复训练仪设计; 层次分析法; 模糊综合评价; 产品设计

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)18-0213-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.18.024

Design of Rehabilitation Training Instrument on the Basis of AHP-FCE

LI Jing, WANG Yi-chen, ZHU Zi-yuan, ZU Jiang-ying

(Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

ABSTRACT: In order to improve the efficiency of rehabilitation training for patients with stroke and brain injury, a series of objective optimization are practiced for the design of rehabilitation training instrument. First of all, methods such as Analytic Hierarchy Process (AHP) and Fuzzy Comprehensive Evaluation (FCE) were used to establish an evaluation model for the design of rehabilitation training instrument. This paper focused on the design evaluation and project decision of rehabilitation training instrument. In terms of design evaluation, the design of rehabilitation training instrument was disassembled into different levels and different elements, and the weight of each design element was calculated and sorted by using the combination of qualitative and quantitative analysis method. Finally, in terms of project decision, based on the ranking of the weight values of each element calculated in the previous stage, the FCE method was applied to score the design scheme of the rehabilitation training instrument, and then the most perfect and optimal design scheme was obtained. The application of AHP and FCE methods in the preliminary design process can effectively avoid subjective factors in product design and provide objective basis for design decision and evaluation.

KEY WORDS: rehabilitation training instrument design; AHP; fuzzy comprehensive evaluation; product design

随着经济的快速发展, 人口老龄化也越来越严重, 中风和脑损伤逐渐成为一种高发病。传统的康复治疗方法已无法满足我国日益增长的治疗需求。康复训练仪作为一种重要的康复训练产品, 在医疗领域发展迅速, 逐渐成为该领域关注的焦点。为了提高患者

的康复治疗效率, 进行康复训练仪的研究和设计是十分必要的。近年来, 层次分析法被广泛地应用于机械设计、公司运营管理等领域。除此之外, 作为一种设计评价的手段, 也常被应用于家居产品的设计过程中。相比之下, 在医疗器械产品领域, 此方法的运用

收稿日期: 2021-04-09

作者简介: 李静 (1975—), 女, 黑龙江人, 硕士, 燕山大学副教授, 主要从事工业设计、服务设计研究。

通信作者: 王依晨 (1994—), 女, 山东人, 燕山大学硕士生, 主攻工业设计。

相对较少。因此,本文尝试在康复训练仪的设计过程中采用层次分析法和模糊综合运算的方法进行方案评估,结合定性和定量两种评价方法,构建康复训练仪设计的分析模型。再以肢体康复训练仪设计为例,对设计方案进行模糊综合评价,得到一个较为严谨的评价结果,为康复训练仪的设计提供重要的参考依据。

1 康复训练仪与评价方法概述

1.1 关于康复训练仪

进入 21 世纪以来,医学工程领域的医用设备发展迅速,包括生物工程、计算机科学在内的诸多技术为其提供了发展的动力^[1]。由于人口老龄化加剧,患者的医疗需求日渐增高,医用设备的研发日益受到重视,尤其是在医疗康复辅助器具方面,市场空间广阔。

康复训练仪是一个复杂的、人机交互极强的机器载体,被应用于医疗领域的治疗训练,涉及的关键技术主要包括关节角度与力矩控制、肌电信息融合感知与控制、力反馈控制、空间运动检测控制等技术^[2]。这些技术集成为一个完整的康复治疗系统,可以辐射到患者治疗以及病情恢复的各个阶段,具有针对性和灵活性。在康复治疗的过程中,仪器与患者之间会产生不同的训练模式和交互方式,如跑步康复训练、步态康复训练、地面步态康复训练、静止康复训练以及足部康复训练等^[3]。文中所研究的康复训练仪集成了训练、康复效果预评以及空间感知等功能,它针对于患者训练过程可以实现有效的控制与检测,在康复训练中大大提高了患者的治疗效果。该仪器设计的主要结构包括底座、外骨骼、支架等,用于固定和支撑患者关节的各个部位。与传统康复训练仪的设计方法有所差异的是,该训练仪除了涉及技术,还会融入多方面的设计元素,如色彩、结构等。

面对日益激烈的市场竞争,如何快速实现产品的更新换代对医疗领域来说是一个值得深思的问题,这直接关系到患者病情能否得到有效的治疗。因此在对方案的设计过程中合理的筛选显得尤为重要^[4]。将康复训练仪的整体设计分解为若干指标,采用层次分析法和模糊综合评价法对其进行评分,经过分析,可以确定出更加符合患者病情的最优设计方案^[5]。

1.2 评价方法概述

1.2.1 层次分析法

目前,多属性、多要素的研究方法已成为主要的研究方向^[6-7]。美国运筹学专家 Saaty 在 20 世纪 70 年代提出层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP), 并广泛应用于与决策相关的各个领域^[8]。在以往的康复训练仪设计评价中,由于设计师对于产品形态、技术、功能或对产品和人的互动系统没有进行设计方案的量化评价,因此方案优选环节存在一定的



图 1 层次分析构造方法

Fig.1 Analytic hierarchy process construction method

困难,本文通过引入层次分析法解决此问题。层次分析法是一种通过对多个目标方案进行比较,将定性与定量相结合,把复杂的问题分解成为一个个可量化的目标对象再归纳总结的科学方法^[9-10]。层次分析构造方法见图 1。

1.2.2 模糊综合评价

模糊集的概念是由美国自动控制专家查德于 1965 年提出的,它是一个模糊综合的评判过程^[11]。它试图以数学的方式来解决感性思维所带来的主观评价,往往涉及一些理念以及方法的结论。在康复训练仪的设计过程中,传统的决策方法对结论的评判缺少客观性,而模糊综合评价则很好地解决了这一问题。用层次分析法和模糊综合评价方法对康复训练仪中的方案进行评价,能够避免传统评价方法中依靠决策人员经验所导致的主观思想,更好地确定各评价因素的权重,获得模糊综合评价的定量结果。渐进式评价方法为科学决策提供了依据。

2 康复训练仪的设计评价层次分析

建立康复训练仪设计的层次分析模型。(1) 目标层。对目标层中仅有的设计要素进行评价,通过一系列运算得到最优设计方案。(2) 准则层。对康复训练仪设计的认知过程是指从目标用户需求中的抽象设计研究到用户群体的具象设计体现的过程。在设计的过程中用户最先感知到的就是产品的外观结构,其次,康复训练仪作为医疗器械,除了满足患者的使用要求之外,在设计中也应与医疗领域的精密性能、安全准则以及人机工学之间有一个完美的结合,从而为使用者传递一种以技术为支撑的设计内在要素。人性化在设计中体现为生理和心理两部分。在设计中要着重关注患者的心理健康,针对于患者的心理治疗是一个长期、复杂的认知过程。它源于患者的心理压力与仪器之间的相关程度,包含在视觉信息所带来的色彩暗示中。因此,以医疗器械设计理念为基础,结合专家访谈,构建出设计准则层方案。该方案包含结构、技术和色彩。(3) 子准则层。根据 Saaty 所提出的层级构造方法,针对准则层中的结构,提出了人机工程尺寸、材料的强度以及造型的美观性 3 个要素作为子准则;针对技术,提出了关节角度与力矩控制、力反馈控制、空间运动检测控制、肌电信息融合感知与控制 4 个要素作为子准则;针对色彩,提出了中性、明亮、暗淡 3 个要素作为子准则。康复训练仪设计层次分析模型见图 2。

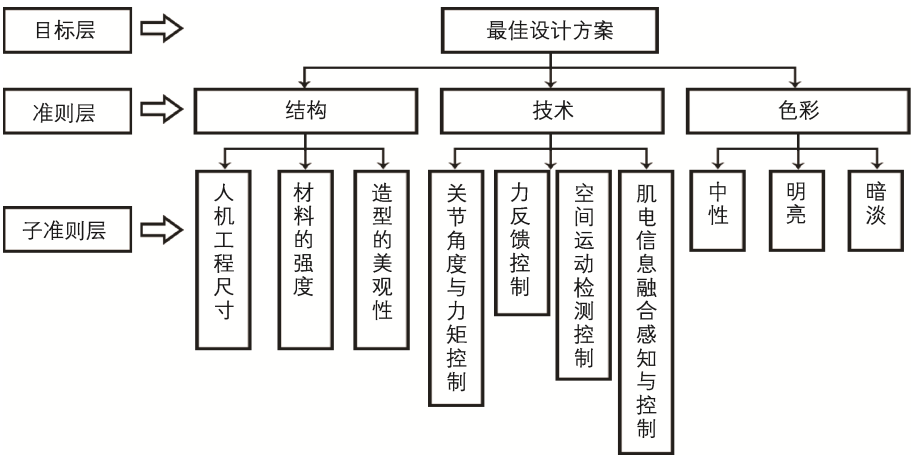


图 2 康复训练仪设计层次分析模型
Fig.2 Hierarchical analysis model of rehabilitation training instrument design

表 1 判断矩阵构建方式 Tab.1 Construction of judgment matrix				
X	Y_1	Y_2	...	Y_n
Y_1	y_{11}	y_{12}	...	y_{1n}
Y_2	y_{21}	y_{22}	...	y_{2n}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		y_{3n}
Y_n	y_{n1}	y_{n2}	...	y_{nn}

表 2 判断矩阵标度 Tab.2 Judgment matrix scale	
标度	含义
1	比较两因素，因素 i 与因素 j 同样重要
3	比较两因素，因素 i 比因素 j 稍微重要
5	比较两因素，因素 i 比因素 j 明显重要
7	比较两因素，因素 i 比因素 j 强烈重要
9	比较两因素，因素 i 比因素 j 极端重要
2、4、6、8 取中值	
倒数	因素 i 与 j 比较的判断 y_{ij} ，则因素 j 与 i 比较的判断 $y_{ji} = 1 / y_{ij}$

表 3 目标判断矩阵及权重 Tab.3 The judgment matrix and weight of the objectives				
O	C_1	C_2	C_3	权重 w
C_1	1	2	3	0.5396
C_2	1/2	1	2	0.2970
C_3	1/3	1/2	1	0.1634

表 4 结构准则判断矩阵及权重 Tab.4 Structure criteria judgment matrix and weight				
C_1	C_{11}	C_{12}	C_{13}	权重 w_1
C_{11}	1	2	3	0.5396
C_{12}	1/2	1	2	0.2970
C_{13}	1/3	1/2	1	0.1634

表 5 技术准则判断矩阵及权重 Tab.5 Technology criteria judgment matrix and weigh					
C_2	C_{21}	C_{22}	C_{23}	C_{24}	权重 w_2
C_{21}	1	3	2	2	0.4155
C_{22}	1/3	1	1/2	1/3	0.1070
C_{23}	1/2	2	1	1/2	0.1849
C_{24}	1/2	3	2	1	0.2926

3 判断矩阵的构建与权重的确定

判断矩阵的构建是层次分析法中的一个重要步骤，对于上一级的某个要素，将本层次的评价要素相对于上一层次要素按照重要程度进行两两比较^[12]。判断矩阵构建方式见表 1。

设要比较的各准则层 $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ 对目标 X 的重要性，则有 Y_i 对 Y_j 各个要素相对重要性的评价，如果相反则为 $1/y_{ij}$ 。其比较的标准是按照 9 级标度^[13]，判断矩阵标度见表 2。

根据层次模型，目标层是康复训练仪设计的最佳方案，用 O 表示；结构、技术和色彩归于准则层，分别用 C_1, C_2, C_3 表示。在子准则层中，人机工程尺寸为 C_{11} ，材料的强度为 C_{12} ，造型的美观性为 C_{13} ；关节角度与力矩控制为 C_{21} ，力反馈控制为 C_{22} ，空间运动

检测控制为 C_{23} ，机电信息融合感知与控制为 C_{24} ；中性为 C_{31} ，明亮为 C_{32} ，暗淡为 C_{33} 。选取目标用户 20 名，包括康复训练仪设计师 5 名，康复训练师 3 名，专业医生 3 名，医疗相关的科学研究人员 4 名，产品设计专业研究生 5 名，对各个要素的层级进行要素评定。目标判断矩阵及权重见表 3，结构准则判断矩阵及权重见表 4，技术准则判断矩阵及权重见表 5，色彩准则判断矩阵及权重见表 6。

判断矩阵权重的计算方法有几何平均法、算数平均法、特征向量法、最小二乘法。以下通过几何平均法得到各个要素的相对权重，过程为：

1) 计算每行标度的乘积： $M_i = \prod_{j=1}^m b_{ij} \quad (i=1,$

表 6 色彩准则判断矩阵及权重
Tab.6 Color criteria judgment matrix and weigh

C_3	C_{31}	C_{32}	C_{33}	权重 w_3
C_{31}	1	2	2	0.4934
C_{32}	1/2	1	1/2	0.1958
C_{33}	1/2	2	1	0.3108

2,⋯,m), 其中 b_{ij} 是第*i*行第*j*列中的元素, *m*是要素量。

2)判断出各行标度乘积的几何平均值: $a_i = \sqrt[m]{M_i}$
(*i*=1, 2, ⋯, *m*)

3) 计算相对权重: $w_i = \frac{a_i}{\sum_{i=1}^m a_i}$

为了确保参与者在评估过程中的一致性, 在得到权重计算结果之后, 需要对判断矩阵的评价结果进行一致性检验, 一致性检验的指标用 *CI* 来表示:

$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$, 其中 $\lambda_{\max}$ 代表最大特征值, $\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{B_{w_i}}{w_i}$, B_{w_i} 代表向量 B_w 第*i*个分量, *n*代表阶数。

通常, 在进行一致性检验时, 需要采用一致性比率 *CR* 值进行判断, $CR = CI/RI$, 通过平均随机一致

性指标得到 *RI* 的具体参数, 平均随机一致性指标见表 7。当 $CR \leq 0.1$ 时, 可以认为检验结果在判断矩阵中的条件得以成立, 如果结果相反, 则需要重新计算。

对目标层 *O*、准则层 *C* 判断矩阵在此评价体系的基础上进行一致性检验。一致性检验结果见表 8。

在结束上述过程之后, 将各准则的权重值进行综合, 得到目标权重。将整理汇总后的结果进行排序, 作为方案的评价依据, 目标权重计算排序表见表 9。

4 康复训练仪应用案例

4.1 方案设计

根据文中的计算结果, 对设计方案进行了初步构想, 并提出了 3 个合理可行的方案。方案一, 以跑步机为基底载体, 利用传送带以及腿部外骨骼辅助人体行走的方式, 达到系统的康复训练的目的。方案二, 以脚部的踏板和肩部的体重支撑器作为承重的载体, 连接踏板的结构部件根据人的步态行走方式和人体关节角度来实现患者肢体的运动模式。方案三, 以静止的底座固定患者的身体重量, 提供患者的整体支撑点, 包括肩部、腰部及臀部。借以外骨骼作为肢体运动的外部因素, 帮助患者完成腿部的周期训练。康复训练仪初步设计方案见图 3。选择医疗器械领域的专家 10 名, 分别对 3 个康复训练仪的设计方案进行评价。

表 7 平均随机一致性指标
Tab.7 Average random consistency index

矩阵阶数												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<i>RI</i>	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49	1.52	1.54

表 8 一致性检验结果
Tab.8 Conformity test results

	<i>O</i>	C_1	C_2	C_3
$\lambda_{\max}$	3.2567	3.2567	4.071	3.0536
<i>CI</i>	0.0046	0.0046	0.024	0.0268
<i>RI</i>	0.5200	0.5200	0.890	0.5200
<i>CR</i>	0.0090	0.0090	0.030	0.0500

表 9 目标权重计算排序表
Tab.9 Target weight computation sorting

	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{21}	C_{22}	C_{23}	C_{24}	C_{31}	C_{32}	C_{33}
C_1	0.5396	0.297	0.1634	—	—	—	—	—	—	—
C_2	—	—	—	0.4155	0.107	0.1849	0.2926	—	—	—
C_3	—	—	—	—	—	—	—	0.4934	0.1958	0.3108
目标权重	0.2912	0.1603	0.0882	0.1234	0.0318	0.0549	0.0869	0.0806	0.032	0.0508
排序	1	2	4	3	10	7	5	6	9	8

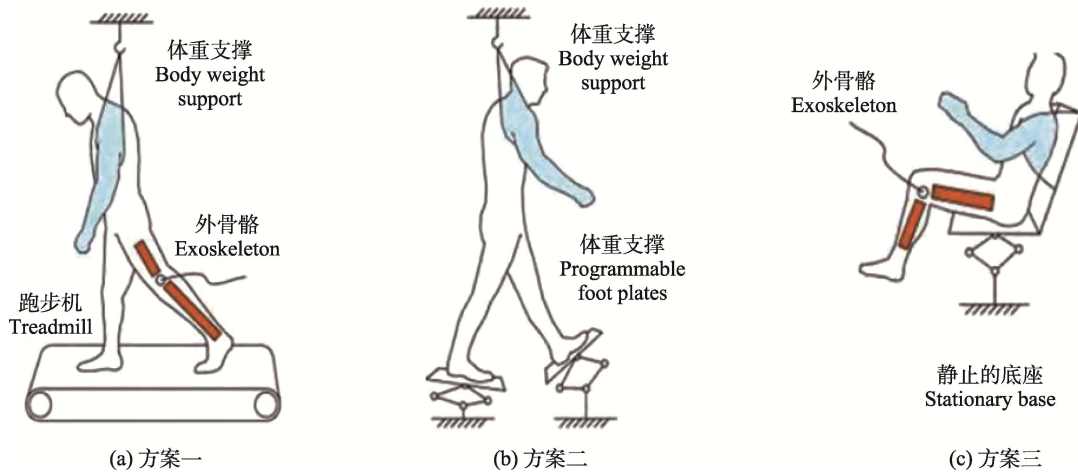


图 3 康复训练仪初步设计方案

Fig.3 Rehabilitation training instrument preliminary design

4.2 模糊综合评价设计评价流程

1) 选取 10 个相关领域的专家作为参与评价的要素。用 $o = \{c_1, c_2, c_3\}$ 来表示，分别是结构、技术、色彩，评估要素子集为 $c_i = \{c_{ij}\}$ ($i, j = 1, 2, 3, 4$)。

2) 确定评语集以及相对应的评价标准。 $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4\} = \{\text{优秀, 良好, 合格, 不合格}\}$ ，给各个评语集分别赋值，赋值后的评语向量为 $\beta = \{90, 80, 60, 50\}^T$ 。规定优秀的得分为 90 分以上，良好的得分为 80~90 分，合格的得分为 60~80 分，不合格的得分小于 60 分。

3) 根据表 3—6 中的数值可以求出各层次要素的权重向量。准则层各要素的权重向量为 $W_0 = (0.5396, 0.297, 0.1634)$ ；子准则层各要素的权重向量为 $W_{C1} = (0.5396, 0.297, 0.1634)$ ， $W_{C2} = (0.4155, 0.107, 0.1849, 0.2926)$ ， $W_{C3} = (0.4934, 0.1958, 0.3108)$ 。

4) 为子准则层对各个方案模糊综合评价矩阵进行构建。以设计方案一为例，统计 10 个专家对子准则层各要素等级评定的打分次数，并对评定结果进行汇总，得到各设计要素相对于等级评定的隶属度。确定子准则层对方案一的评价矩阵。 D_1 代表结构的子准则层对方案一的评价矩阵； D_2 代表技术的子准则层对方案一的评价矩阵； D_3 代表色彩的子准则层对方案一的评价矩阵，结果如下：

$$D_1 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.3 & 0.2 & 0 \\ 0.4 & 0.2 & 0.4 & 0 \\ 0.3 & 0.4 & 0.3 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D_2 = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.1 & 0.5 & 0 \\ 0.3 & 0.4 & 0.3 & 0 \\ 0.2 & 0.2 & 0.6 & 0 \\ 0.5 & 0.2 & 0.3 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D_3 = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.2 & 0.5 & 0 \\ 0.3 & 0.3 & 0.4 & 0 \\ 0.2 & 0.2 & 0.6 & 0 \end{bmatrix}$$

由单因素模糊综合评价矩阵运算，可以得出准则层对于设计方案一的评价权重向量为：

$$P_1 = W_{C1} \times D_1 = (0.418, 0.312, 0.27, 0)$$

$$P_2 = W_{C2} \times D_2 = (0.382, 0.18, 0.439, 0)$$

$$P_3 = W_{C3} \times D_3 = (0.284, 0.23, 0.487, 0)$$

由此来构建 2 级评价矩阵：

$$P = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.418, 0.312, 0.27, 0 \\ 0.382, 0.18, 0.439, 0 \\ 0.284, 0.23, 0.487, 0 \end{bmatrix}$$

5) 接着对设计要素进行综合性评定，得到方案的百分制评价结果。

综合评价权重向量为：

$$W = W_0 \times P = (0.385, 0.259, 0.356, 0)$$

方案一的百分制评定结果为： $N = W \times \beta = 76.73$

同理可得方案二为 74.77，方案三为 81.29。因此通过评分结果可以得知方案三为最佳方案。

对方案三的造型和细节进行了进一步的设计和细化，以实现该方案对准则层的合理匹配。方案三效果图见图 4，方案三细节图见图 5。

在方案设计的过程中，考虑到人机工学的影响因素，故而对人体的尺寸进行参数化分析。中国成年人人体主要尺寸^[14]见表 10。为确保产品的设计参数能够适用于更多人群，取 10%~90% 的数值，并设置外骨骼结构杆长的可调范围。例如，当大腿连杆的长度在 428mm 以下可满足 5% 的使用人群，在 505mm 以下可满足 95% 的使用人群，因此当大腿连杆的长度在 428~505mm 的范围之内时可满足 90% 的使用人群，以此类推，得到产品的尺寸设计，方案三尺寸图见图 6。



图 4 方案三效果图
Fig.4 Effect diagram of scheme III



图 5 方案三细节图
Fig.5 Detail diagram of scheme III

表 10 中国成年人人体主要尺寸 (男性, 18~60 岁)

Tab.10 The main body size of Chinese adults (Male, from 18 years old to 60 years old)

身高位数/%	1	5	10	50	90	95	99
身高/mm	1543	1583	1604	1678	1754	1755	1814
体重/kg	44	48	50	59	71	75	83
上臂长/mm	279	289	294	313	333	338	349
前臂长/mm	206	216	222	237	253	258	268
臀宽/mm	273	282	288	306	327	334	346
大腿长/mm	413	428	436	465	496	505	523
小腿长/mm	324	338	344	369	396	403	419



图 6 方案三尺寸图
Fig.6 Scheme III dimensions

在结构的设计上,依据人体背部脊椎的线条走向构建出合理的底座靠背形态;在材料的强度上,采用碳纤维技术材料压膜成型,各个部件之间运用混合连接的方式来增强仪器的抗压强度及灵活性;在美观性上,材料表面采用磨砂和喷砂相结合的处理工艺,仪器整体采用流线型设计风格,使得产品外观简洁的同时又增加了空间上的形式美感。

5 结语

本文运用层次分析法和模糊综合评价相结合的方法,首先构建层次分析模型,对康复训练仪的各个构成要素进行系统分析,并针对各要素进行权重计算,评估其在整体中所占的重要性。然后依据权重结果,对3款康复训练仪进行方案综合评定,借由模糊综合评价筛选出最佳方案,并对方案做出进一步的设计完善。通过以上研究方法的联合运用,一方面可以优化康复训练仪的设计流程,使设计方案更具科学性与合理性;另一方面可以为同类医疗康复产品的设计提供一定的研究借鉴。

参考文献:

- [1] 王林,翟震. 肢体恢复仪器设备发展状况和前景[J]. 科技创新与应用, 2016(36): 6-7.
WANG Lin, ZHAI Zhen. Development Status and Prospects of Limb Recovery Equipment[J]. Technology Innovation and Application, 2016(36): 6-7.
- [2] 谭民,王硕. 机器人技术研究进展[J]. 自动化学报, 2013, 39(7): 963-972.
TAN Min, WANG Shuo. Research Progress on Robotics[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(7): 963-972.
- [3] IÑAKI DÍ. Lower-Limb Robotic Rehabilitation: Literature Review and Challenges[J]. Journal of Robotics, 2011(1): 1-11.
- [4] 罗仕鉴,应放天,李佃军. 儿童产品设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
LUO Shi-Jian, YING Fang-Tian, LI Dian-Jun. Children's Product Design[M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [5] 邓卫斌,祝红星. 基于层次分析法的儿童智能手表设计评价研究[J]. 包装工程, 2018, 39(8): 121-125.
DENG Wei-bin, ZHU Hong-xing. Design Evaluation of Children's Smart Watches Based on AHP[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(8): 121-125.
- [6] 冯青,吴限,耶虹菲,等. 基于优度理论的产品设计知识评价方法研究[J]. 包装工程, 2015, 36(6): 100-104.
FENG Qing, WU Xian, YE Hong-fei. et al. The Evaluation Method of Product Design Knowledge Based on the Priority Degree Theory[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(6): 100-104.
- [7] Vaidya O S, Kumar S. Analytic Hierarchy Process: An Overview of Applications[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 169(1): 1-29.
- [8] 齐继阳,任丽娜,高健,等. 基于模糊层次分析法的海洋平台健康评估[J]. 机械设计与制造, 2016(6): 218-221.
QI Ji-yang, REN Li-na, GAO Jian. et al. Research on Evaluation of Health Status of Offshore Platforms Structure in Service[J]. Machinery Design & Manufacture, 2016(6): 218-221.
- [9] SAATY T L. Analytic Hierarchy Process[J]. Mathematical Models for Decision Support, 2013(4): 109-121.
- [10] SAATY T L. Decision Making with the Analytic Hierarchy Process[J]. International Journal of Services Sciences, 2008, 1(1): 83-98.
- [11] 王曙燕,张兴根. 基于云模型的老人手机易用性评估模型研究[J]. 计算机工程与应用, 2016(5): 245-251.
WANG Shu-yan, ZHANG Xing-gen. Research on Evaluation Model of Mobile Phones for Elderly Usability Based on Cloud Model[J]. Computer Engineering and Applications, 2016, 52(19): 245-251.
- [12] 黄河,杨明刚. 基于感性工学的老年人智能产品可用性研究[J]. 机械设计, 2016, 33(4): 109-112.
HUANG He, YANG Ming-gang. Research on Usability of Intelligent Products for the Elderly Based on Kansei Engineering[J]. Journal of Machine Design, 2016, 33(4): 109-112.
- [13] Saaty T L, Vargas L G. Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process[M]. New York: Springer US, 2012.
- [14] 国家标准化管理委员会. GB/T 1000—1988, 中国成年人人体尺寸[S]. 北京: 国家技术监督局, 1988.
National Standardization Management Committee. GB/T 1000—1988, Human Dimensions of Chinese Adults[S]. Beijing: State Technical Supervision Bureau, 1998.