

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2021.03.013

# 基于 AHP-TOPSIS 的上肢康复训练仪设计与评估

赵项,魏峰,白伊莎

(福建工程学院 设计学院,福建 福州 350118)

**摘要:**为满足偏瘫患者在上肢康复训练中的功能需求和审美诉求,提高患者的康复体验,构建层次分析法(AHP)与逼近理想解排序法(TOPSIS)相结合的模型,进行设计与方案评估。基于 AHP 法构建递阶层级模型,应用几何平均法计算各层级指标的权重值,根据权重值优先排序结果得出 3 个设计方案;应用 TOPSIS 法对 3 个方案进行综合评估,得出最佳设计方案;对优选方案进行手板模型制作,完成设计成果评估与验证。结果表明,将 AHP 法和 TOPSIS 法相结合,可有效获取方案设计重点,避免决策者主观性,增强设计方案合理性。该方法可为同类康复训练仪研发提供参考思路。

**关键词:**上肢康复训练仪;层次分析法;逼近理想解排序法;设计与评估

中图分类号:TH789

文献标志码:A

文章编号:1672-4348(2021)03-0281-07

## Research on the design and evaluation of upper limb rehabilitation training equipment based on AHP-TOPSIS

ZHAO Xiang, WEI Feng, BAI Yisha

(School of Design, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** In order to meet the functional and aesthetic demands of hemiplegic patients in upper limb rehabilitation training, and improve the patients' rehabilitation experience, a model combining the analytic hierarchy process (AHP) and the technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) was constructed for the design and evaluation of the scheme. Firstly, a hierarchical model was built based on the AHP method, the geometric average method was used to calculate the weight value of each level index. Three design schemes were obtained according to the priority ranking result of the weight values. Secondly, the TOPSIS method was applied to comprehensively evaluate the three design schemes and obtain the best one. Finally, a prototype model was made for the optimal scheme, and the design result evaluation and verification were completed. Results show that the combination of the AHP method and the TOPSIS method can help efficiently obtain the key points of the scheme design, effectively avoid the subjectivity of decision-makers, and enhance the rationality of the design program. This method can provide reference for the research and development of similar rehabilitation training devices.

**Keywords:** upper limb rehabilitation training equipment; AHP; TOPSIS; design and evaluation

近年来,遗传基因和个人习惯等因素导致的脑卒中患者数量不断攀升,脑卒中所致的偏瘫患

者数量每年大约新增 200 万<sup>[1]</sup>。如不及时进行合理的康复治疗,偏瘫患者的自主行动能力将会逐

收稿日期:2021-02-23

基金项目:教育部“产学研协同育人”项目(201902122004);福建省教育科学“十三五”规划课题(FJJKCG19-084);福建省社会科学规划基础研究项目(FJ2019B116)

第一作者简介:赵项(1995—),男,云南腾冲人,硕士研究生,研究方向:感性工学,设计创新方法及理论研究。

通信作者:魏峰(1971—),男,福建福清人,教授,研究方向:感性空间设计及设计历史与理论研究。

渐减弱并消失,从而给家庭和社会带来巨大的压力<sup>[2]</sup>。现代康复医学证明:偏瘫患者进行合理的手臂康复训练可修复大脑受损的神经元,或促使受损的神经元再生,进而达到肢体的功能重塑,提高独立自主的生活能力<sup>[3]</sup>。相关康复仪器成为设计研究热点,如可穿戴式的外骨骼上肢康复机器人设计方案<sup>[4]</sup>、四自由度上肢康复器械的控制系統<sup>[5]</sup>、满足患者感性需求的上肢康复机器人<sup>[6]</sup>、符合人体关节运动机理且具有舒适性外骨骼上肢可穿戴设备<sup>[7]</sup>等。除此之外,还有学者基于不同开发技术对偏瘫患者上肢康复训练器械进行了设计与验证。然而,这些研究大部分缺乏恰当的理论支撑,造型设计大都遵循经典工业设计时期的“形式追随功能”原则,设计要素优先次序模糊不清,设计方案评价主观性较强,缺乏一定的科学性与合理性。所以以现代设计研究常用的决策理论为基础来构建模型并用于偏瘫患者上肢康复训练仪的研发很有必要。

1 基于 AHP 和 TOPSIS 的模型构建

近年来,层次分析法(AHP)、逼近理想解排序法(TOPSIS)、熵权法(EWM)等多准则决策方法被广泛应用于器械设备研发中。AHP 法具有系统化、简单实用的优势,20 世纪 70 年代初由美国运筹学家 T. L. Saaty 提出,将与决策相关的因素拓展至目标、准则和子准则等层次,把定性问题进行定量分析,并通过计算权重系数,得出最佳方案<sup>[8]</sup>。如融合 AHP 与 QFD 对老年人健身器械进行分析研究,设计出符合老年人健身的器械<sup>[9]</sup>;将 AHP 法应用于卫浴产品研发,设计出满足小户型家庭需求的卫浴产品<sup>[10]</sup>;基于 AHP 法和 TRIZ 理论对残障人轮椅进行创新设计<sup>[11]</sup>。可见,AHP 法在工业产品研发中能构建合理的量化模型并科学地计算各层级要素的权重值,明确设计重点并进行方案构思,具有可行性和有效性。

然而,随着知识库和技术更新迭代不断加速,如何快速从设计方案中选择最佳方案以确保方案的科学性与前瞻性成为新的难题,因此选择客观的综合评价方法尤为重要。设计综合评价属于多准则、多指标的评估体系,常见的方案评分优选具有较强的主观性。而 TOPSIS 法作为新的多准则决策方法之一,对初始矩阵进行归一化处理后,引入正、负理想解概念,并通过评价对象到正、负理

想解的距离来判断方案优劣排序,若方案离正理想解最近、离负理想解最远,则为最优方案<sup>[12]</sup>。但是 TOPSIS 法无法明确各项评价指标的权重,故需事先对其赋值权重,将 TOPSIS 与 AHP 法结合对多个评价指标或设计属性进行利弊权衡、决策制定以及方案排序时赋值更为便捷、科学高效<sup>[13]</sup>。因此本研究将 AHP 与 TOPSIS 相结合,对评价指标进行权重计算及规范判断矩阵,以期为偏瘫患者上肢康复训练仪构思及方案选择提供科学合理的设计评价框架,具体如图 1 所示。

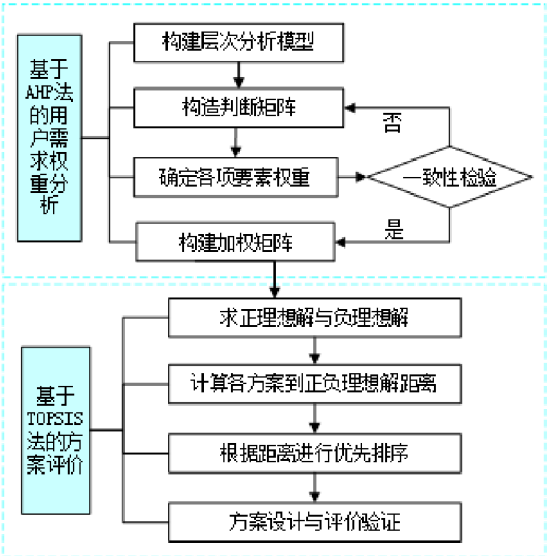


图 1 基于 AHP-TOPSIS 的设计评价流程  
Fig.1 Design and evaluation process based on AHP-TOPSIS

2 基于 AHP 法的上肢康复训练仪设计重点提取

2.1 偏瘫患者上肢康复训练仪设计层次分析模型构建

通过梳理文献[14]和文献[15]、问卷调查与专家访谈得知:偏瘫患者上肢康复训练仪的设计要素多维,患者最先感知到的是产品外观。作为医疗器械,除满足审美诉求外,还要通过结构、材料等体现医疗产品的精密与安全,缓解患者的恐惧心理。在上肢康复训练仪开发中,还要充分顾及操作问题,从多个角度涉入,使设计更加人性化。总之,偏瘫患者上肢康复训练仪是集造型美、技术美和功能美于一体的产品,研发过程中须充分考虑患者心理和生理特点并高度关注色彩、造型、安全、操作和功能属性。

第一,色彩属性。色彩作为一种康复器械设计的语言,主要以单色、复色和多种色彩搭配呈现,合理的配色可消除患者焦虑情绪并营造一种轻松愉快的康复氛围,还可加快患者的新陈代谢和改善康复疗效。上肢康复训练仪的色彩设计主要以温馨、纯净的医疗配色为主,包含米白色和蓝色。第二,造型属性。造型设计可归纳为传统型、创新型和组合型三种形态,造型所传达出的意象对偏瘫患者的康复效果影响较大。亲切、温馨的造型意象可增进设备与患者的交互,提高患者的康复效率。简洁大方、温馨体贴的医疗风格更符合患者的美学诉求。第三,安全属性。安全性严重影响着患者的恐惧心理指数与康复训练热情,并一定程度上决定了患者及家属在康复器械上的选择。安全要素主要表现为材料可靠、结构稳固、安全与便捷固定上肢。第四,操作属性。操作主要以康复医师控制为主,患者操作为辅,综合考虑患者的生理、心理状况以及医师的工作强度,操作

要素主要由记录康复数据、医师智能控制和患者操作简单三点构成。第五,功能属性。人体上肢主要包括肩关节、肘关节、腕关节、手指以及各肌群,对这些关节和肌群进行针对性的康复训练,可促使患者大脑受损的神经元再生或修复,从而尽早达到相应肢体的功能重塑。

综上所述,构建出偏瘫患者上肢康复训练仪设计的层次分析模型<sup>[16]</sup>,如图 2 所示。目标层:位于模型的最高层,为偏瘫患者上肢康复训练仪设计最佳方案,用  $O$  表示。准则层:上肢康复训练仪的设计属性,包括功能属性、操作属性、安全属性、造型属性和色彩属性,分别用  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$  表示。子准则层:根据 Saaty 提出的层级构造方法<sup>[17]</sup>,经分析与整理,将准则层的 5 个设计属性拓展为对应子准则层 18 项设计要素,其中肩关节康复用  $A_1$  表示,肘关节康复为  $A_2$ ,腕关节康复为  $A_3$ ,手指康复为  $A_4$ ,肌群康复为  $A_5$ ,以此类推。

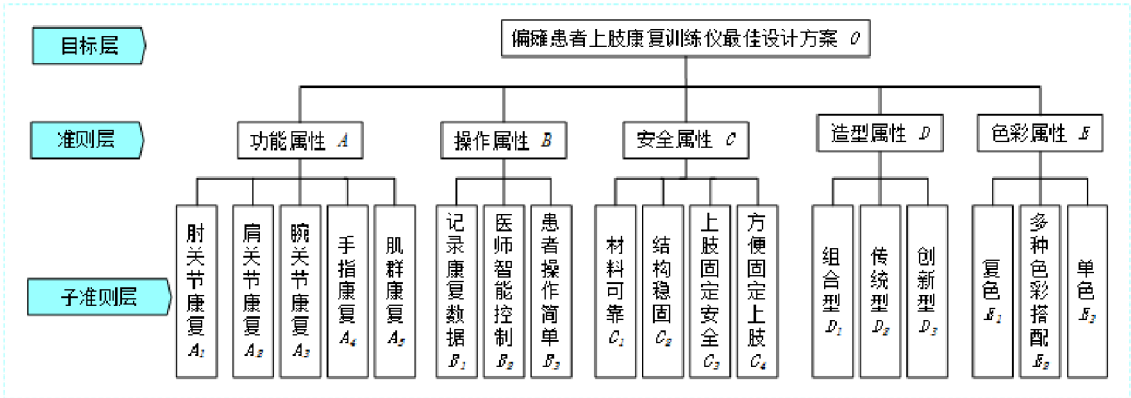


图 2 偏瘫患者上肢康复训练仪设计评价层次分析模型

Fig.2 An analytic hierarchy process model for the design and evaluation of upper limb rehabilitation equipment

2.2 构造判断矩阵

本研究中,构造判断矩阵可将每一层次直接关联要素的重要程度进行比较<sup>[18]</sup>,并通过计算得出每个层次中各设计要素的权重值,判断矩阵中比较元素  $X_{ij}$  采用 Saaty 所提的 1-9 标度<sup>[19]</sup>。为了提高判断矩阵分析的准确性,本研究调研对象均接触偏瘫患者上肢康复训练仪两年以上并对其有较深了解。同时,为了使研究结果具有普遍性,本研究共对 30 名与偏瘫患者上肢康复训练仪相关的人员进行测试,其中包括 10 名上肢康复器械专家、7 名康复治疗医师、7 名康复医学研究者和 6 名主攻康复产品设计的硕士研究生,要求他们

对准则层中的两两设计属性与各子准则层中的两两设计要素进行比较评分。

2.3 权重计算

根据判断矩阵,采用几何平均法<sup>[20]</sup>计算出准则层和子准则层设计要素权重,大致运算步骤如下:

(1) 计算每行的标度乘积:

$$M_i = \prod_{j=1}^m b_{ij} \quad (i = 1, 2, \cdots, 3) \tag{1}$$

式(1)中  $b_{ij}$  为第  $i$  行第  $j$  列中的需求指标; $m$  为评价指标量。

(2) 判断各行标度乘积的几何平均值:

$$a_i = \sqrt[m]{M_i} \quad (i = 1, 2, \cdots, 3) \tag{2}$$

(3) 计算相对权重:

$$W_i = \frac{a_i}{\sum_{i=1}^m a_i}$$

(3)

(4) 计算最大特征根:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{B_{W_i}}{W_i}$$

(4)

式(4)中  $B_{W_i}$  为向量  $B_W$  第  $i$  个分量; $n$  为阶数。

(5) 结果一致性检验:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

(5)

式(5)中  $n$  为判断矩阵评价标度所对阶数。

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

(6)

式(6)中  $RI$  为平均随机一致性指标,各阶数均有相对应的数值,如表 1 所示; $CR$  为一致性比值,当  $CR \leq 0.1$ ,表明一致性检验通过;当  $CR > 0.1$  时,则表示一致性检验未通过,需对判断矩阵进行检查,更正后再次计算分析。

表 1 平均随机一致性指标

Tab.1 Average random consistency index

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46

根据上述几何平均法运算流程,结合判断矩阵调查结果,通过标度乘积、相对权重计算得到各层级设计要素的相对权重,如表 2 所示。为确保调研对象在评价时思维的一致性以及判断矩阵的相容性,通过计算最大特征根辅助判断矩阵结果一致性检验,结果显示  $CR$  值均小于 0.1,说明通过一致性检验,如表 3 所示。

表 2 各层级判断矩阵及权重

Tab.2 Attribute judgment matrix and weight of each level

层级属性	比较元素						权重
	$O$	$A$	$B$	$C$	$D$	$E$	
准则层	$A$	1	1/2	1/2	3/1	3/1	0.088
	$B$	2	1	1/3	1/2	1/2	0.127
	$C$	2	3	1	2	1/2	0.249
	$D$	3	2	1/2	1	1/3	0.179
	$E$	3	2	2	3	1	0.357
	$O$						

续表

层级属性	比较元素						权重
功能属性	$A$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	权重值
	$A_1$	1	2	1/2	1/2	2	0.168
	$A_2$	1/2	1	1/3	1/2	1/5	0.072
	$A_3$	2	3	1	1/3	3	0.243
	$A_4$	2	5	3	1	3	0.407
	$A_5$	1/2	2	1/3	1/3	1	0.110
操作属性	$B$	$B_1$	$B_2$	$B_3$			权重值
	$B_1$	1	3	1/2			0.334
	$B_2$	1/3	1	1/3			0.141
	$B_3$	2	3	1			0.525
安全属性	$C$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$		权重值
	$C_1$	1	3	1/2	1/3		0.192
	$C_2$	1/3	1	1/2	1/3		0.111
	$C_3$	2	2	1	1/2		0.255
	$C_4$	3	3	2	1		0.422
造型属性	$D$	$D_1$	$D_2$	$D_3$			权重值
	$D_1$	1	2	1/3			0.252
	$D_2$	1/2	1	1/3			0.159
	$D_3$	3	3	1			0.589
色彩属性	$E$	$E_1$	$E_2$	$E_3$			权重值
	$E_1$	1	1/2	2			0.297
	$E_2$	2	1	3			0.539
	$E_3$	1/2	1/3	1			0.164

表 3 一致性检验结果

Tab.3 Consistency test result

项目	$O$	$A$	$B$	$C$	$D$	$E$
$\lambda_{\max}$	5.263	5.166	3.054	4.168	3.054	3.009
CI	0.066	0.041	0.027	0.056	0.027	0.005
RI	1.120	1.120	0.520	0.890	0.520	0.520
CR	0.059	0.037	0.052	0.063	0.052	0.009

为进一步明确子准则层设计要素对偏瘫患者上肢康复训练仪设计产生影响的重要程度,计算子准则层各设计要素与其对应准则层设计属性的乘积,得出偏瘫患者上肢康复训练仪 18 个设计要素的综合权重,经整理与排序,结果如表 4 所示。



表 4 设计要素综合权重及排序

Tab.4 Comprehensive weight and ranking of the design elements

项目	A	B	C	D	E	综合权重	排序
A <sub>1</sub>	0.168					0.0148	16
A <sub>2</sub>	0.072					0.0063	18
A <sub>3</sub>	0.243					0.0214	14
A <sub>4</sub>	0.407					0.0358	11
A <sub>5</sub>	0.110					0.0097	17
B <sub>1</sub>		0.334				0.0424	10
B <sub>2</sub>		0.141				0.0179	15
B <sub>3</sub>		0.525				0.0667	5
C <sub>1</sub>			0.192			0.0479	8
C <sub>2</sub>			0.111			0.0276	13
C <sub>3</sub>			0.255			0.0635	6
C <sub>4</sub>			0.442			0.1101	2
D <sub>1</sub>				0.252		0.0451	9
D <sub>2</sub>				0.159		0.0284	12
D <sub>3</sub>				0.589		0.1054	4
E <sub>1</sub>					0.297	0.1061	3
E <sub>2</sub>					0.539	0.1924	1
E <sub>3</sub>					0.164	0.0585	7

2.4 权重分析与设计重点提取

根据上述设计属性和要素权重计算结果得知:设计研发偏瘫患者上肢康复训练仪时,应高度重视产品的色彩属性,充分考虑多种颜色组合搭配,米白色和蓝色为现代医疗康复产品设计较为常用的颜色;造型设计上要突破传统形态,造型新颖、简洁大方、温馨体贴的医疗风格更符合患者的美学诉求;功能设计上以腕关节训练和手指康复功能为主;具体操作上应简单方便,能使患者便捷固定上肢。

3 基于 TOPSIS 法的上肢康复训练仪设计与评价

3.1 方案设计

根据以上分析,将功能、操作、安全、造型、色彩属性及其对应的设计要素进行有机整合,基于工业设计程序与方法,结合技术、结构与人机工学对偏瘫患者上肢康复训练仪进行创新设计,经初

步构思提出 3 个可行性方案,如图 3 所示。方案 1,以手肘放置托为上肢主要的承重载体,将旋转轴与保护罩连接,在保护罩中进行腕关节与手指康复训练;方案 2,以固定的底座支架支撑设备,上肢承重载体可根据患者需求滑动,旋转轴中部与手肘放置托之间的距离可根据患者手臂尺寸进行适当调整;方案 3,以底部支撑板为设备的基底载体,手指康复部件与旋转轴连接作为患者训练的核心。3 个方案均以蓝色和白色搭配为主,具有人文关怀的创新形态,均可对偏瘫患者进行手指发力康复与手腕旋转力度训练。

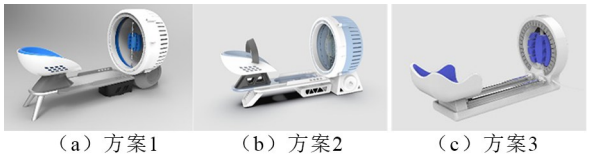


图 3 方案设计  
Fig.3 Design schemes

为有效避免决策的主观性,客观确定各方案的优先排序,采用层次分析模型中的 18 项设计要素作为 TOPSIS 法评价指标,评价步骤如下:

(1)邀请康复医疗器械设计专家、康复医师和康复设备研究者共 18 名,分别对 3 个初步方案的评价指标进行打分,采取 7 级李克特量表(1-7 分别表示:非常不满意、很不满意、不满意、一般、满意、很满意、非常满意),评分结果均值化后可得表 5 所示的初始评价矩阵,用 *F* 表示。

表 5 初始评价矩阵  
Tab.5 Initial evaluation matrix

项目	方案一	方案二	方案三
A <sub>1</sub>	1.3	1.4	1.2
A <sub>2</sub>	1.4	1.6	1.5
A <sub>3</sub>	4.8	5.1	4.6
A <sub>4</sub>	4.2	4.9	4.3
A <sub>5</sub>	3.2	4.6	4.1
B <sub>1</sub>	4.2	5.2	4.1
B <sub>2</sub>	3.6	4.6	3.8
B <sub>3</sub>	3.8	4.2	4.1
C <sub>1</sub>	4.2	5.1	4.3

续表

项目	方案一	方案二	方案三
$C_2$	4.6	5.4	4.5
$C_3$	3.9	4.8	4.1
$C_4$	4.6	5.1	4.2
$D_1$	3.4	4.1	4.0
$D_2$	4.2	4.6	4.1
$D_3$	4.8	6.2	5.1
$E_1$	4.6	4.9	4.7
$E_2$	4.8	5.1	4.9
$E_3$	1.7	1.6	1.4

(2) 规范化初始评价矩阵, 得到标准化矩阵  $R_{ij}$  :

$$R_{ij} = \frac{f_{ij}}{\sum_{i=1}^m f_{ij}^2} \quad i = 1, 2, \cdots, m; j = 1, 2, \cdots, n \quad (7)$$

(3) 根据各项评价指标的目标权重, 计算出权重规范化矩阵  $u_{ij}$  :

$$u_{ij} = W_j R_{ij} \quad (8)$$

(4) 求正理想解  $A^+$  和负理想解  $A^-$  :

$$\begin{aligned} M_j^+ &= \max \{ u_{1j}, u_{2j}, \cdots, u_{mj} \} \quad j = 1, 2, \cdots, m \\ M_j^- &= \min \{ u_{1j}, u_{2j}, \cdots, u_{mj} \} \quad j = 1, 2, \cdots, m \end{aligned} \quad (9)$$

则:

$$\begin{aligned} A^+ &= (M_1^+, M_2^+, \cdots, M_m^+) \\ A^- &= (M_1^-, M_2^-, \cdots, M_m^-) \end{aligned} \quad (10)$$

(5) 通过欧几里得距离计算各方案到理想解的距离尺度, 各方案到正理想解的距离为  $S_i^+$ , 到负理想解的距离为  $S_i^-$  :

$$\begin{aligned} S_i^+ &= \sqrt{\sum_{j=1}^n (u_{ij} - u_j^+)^2} \quad i = 1, 2, \cdots, m \\ S_i^- &= \sqrt{\sum_{j=1}^n (u_{ij} - u_j^-)^2} \quad i = 1, 2, \cdots, m \end{aligned} \quad (11)$$

(6) 计算各方案到理想解的相对贴近度:

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad i = 1, 2, \cdots, m \quad (12)$$

根据上述运算程序, 结合层次分析权重对初始评价矩阵进行规范化处理得到权重规范化矩阵, 经正、负理想解计算公式运算得到: 正理想解 = (0.047, 0.040, 0.078, 0.195, 0.846, 0.522, 0.044,

0.063, 0.334, 0.311, 0.326, 0.271, 0.229, 0.097, 0.646, 0.029, 0.027, 0.092), 负理想解 = (0.040, 0.035, 0.070, 0.167, 0.588, 0.412, 0.348, 0.057, 0.275, 0.259, 0.265, 0.223, 0.190, 0.086, 0.500, 0.027, 0.026, 0.076), 通过欧几里得算法与相对贴近度运算, 得到表 6 所示结果。其中, 根据  $C_i$  值大小判断方案的优先程度, 值越大反映出方案的优先程度越高, 由此可得方案 2 最佳。

表 6 正、负理想解及相对贴近度  
Tab.6 Positive and negative ideal solutions and their relative proximity

方案	$S_i^+$	$S_i^-$	$C_i$	排序
方案 1	0.346	0.030	0.079	3
方案 2	0.005	0.352	0.985	1
方案 3	0.225	0.174	0.435	2

在方案 2 中, 患者进行康复训练时, 将手肘用绑带固定在放置托上, 手指按照对应指位握住手指测力计。患者可通过电动机设定的阻力进行主动手腕旋转训练, 也可通过电动机的圆周运动进行被动康复训练, 还可通过手指测力计进行手指发力的康复训练。由于受人体尺寸的影响, 手肘至手指测力计之间采取滑动式的设计, 确保其可适用于不同体格的患者。

3.2 方案评估

为了少走弯路, 对方案 2 的造型、色彩、功能与结构进行计算机辅助细节设计, 如图 4 所示, 并制作 1:1 手板模型进行满意度评分与验证。

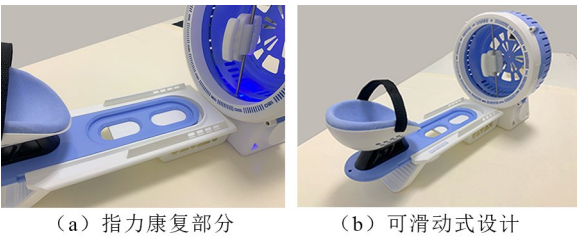


图 4 设计细节图

Fig.4 Simulated rehabilitation training

以手板模型为基础, 首先邀请 8 位康复器械设计专家与 11 位康复医师对此训练仪打分评估, 评分区间为 0~50 分, 其中 1~10 分为很不好, 11~20 分为不好, 21~30 分为一般, 31~40 为好,

41~50 为很好。其次邀请 16 位福建省康复医院的进入主动康复阶段的偏瘫患者对此方案进行满意度评分与人机尺寸验证,其身高、体重、性别各不相同,并让其对此设备评分,细则同上。最后,取平均值作为评估参考,经过计算得出评分结果为 35.8,表明此方案具有可行性。

## 4 结语

上肢康复训练仪的设计研究,将 AHP 法与

TOPSIS 法相结合,通过构建合适的层次分析模型与设计要素的判断矩阵,计算各设计要素的相对权重以明确设计重点,并根据设计程序与原则进行方案构思和综合评价,得出最佳方案,优化了上肢康复训练仪的设计流程,提高了方案优选的科学性与严谨性,可为同类医疗康复训练仪设计提供参考。由于受测人员数量及认知差异影响,评估结果有一定的偏差,后续研究将继续完善,增强研究的客观性。

## 参考文献:

- [1] 郭金华. 中国老龄化的全球定位和中国老龄化研究的问题与出路[J]. 学术研究,2016(2):61-67.
- [2] 杨涛,高学山,彭晋民,等. 基于扩展 AD 理论的下肢康复机器人概念设计研究[J]. 机械设计,2018,35(7):114-118.
- [3] 叶九波. 康复护理训练对脑梗塞患者偏瘫肢体恢复效果研究[J]. 黑龙江科学,2019,10(18):48-49.
- [4] 孙超,苑明海,周灼,等. 外骨骼上肢康复机器人的结构设计与仿真研究[J]. 机电工程,2019,36(4):383-386.
- [5] 余刚,钱晋武,沈林勇,等. 上肢康复机器人控制系统设计[J]. 机械设计与制造,2013(11):241-244.
- [6] 韩华林. 基于感性工学的上肢康复外骨骼设计研究[D]. 武汉:湖北工业大学,2018.
- [7] 刘志辉. 外骨骼上肢运动功能康复系统的人因工程研究[D]. 上海:东华大学,2017.
- [8] 邹涛,朱江雪. 装备制造企业产品创新设计思维评估方法[J]. 机械设计,2020,37(9):140-144.
- [9] 唐琳,常瑜,王子瑞. 基于 QFD 与 AHP 的老年人健身器械造型设计[J]. 包装工程,2019,40(24):199-204.
- [10] 杨昕妍,张仲凤. 一款基于 AHP 层次分析法的卫浴产品设计[J]. 包装工程,2021,42(4):144-147,153.
- [11] 辜俊丽,宋端树,崔天琦,等. 基于 AHP 与 TRIZ 的残障人轮椅设计[J]. 包装工程,2019,40(24):187-193.
- [12] 陈香,卫华. 基于结构熵权 TOPSIS 法的产品设计方案评估研究[J]. 图学学报,2020,41(3):446-452.
- [13] 陈哲,尚凯,张青,等. 基于 TOPSIS-PSI 方法的办公座椅设计评价[J]. 林业工程学报,2020,5(6):179-184.
- [14] 郭盛,马可,王向阳. 新型可穿戴上肢康复机构的设计与分析[J]. 北京交通大学学报,2020,44(4):132-140.
- [15] 袁超. 家用上肢康复产品设计[D]. 南京:东南大学,2019.
- [16] 武春龙,朱天明,张鹏,等. 基于功能模型和层次分析法的智能产品服务系统概念方案构建[J]. 中国机械工程,2020,31(7):853-864,870.
- [17] SAATY T. Analytic hierarchy process[J]. Mathematical Models for Decision Support,2013(4):109-121.
- [18] 刘耀铃,李文强,秦希佳,等. 基于 AHP-模糊综合的复杂装备性能指标评价与反馈方法[J]. 机械设计与研究,2020,36(6):8-14.
- [19] 徐骁琪,程永胜,陈国强. 基于 AHP 法的房车造型评价方法及应用研究[J]. 机械设计,2020,37(6):140-144.
- [20] 程永胜,徐骁琪,卜俊,等. 基于 KE 和 AHP 理论的汽车造型意象评价方法研究[J]. 现代制造工程,2020(7):102-109.

(责任编辑:王圆圆)