

基于 AHP 和加权灰色关联分析的并条机设计评价研究

柴敏, 马彧

(天津工业大学, 天津 300387)

摘要: **目的** 为客观评价定性指标因素对并条机设计的影响, 降低人在决策设计方案过程中的主观性偏差, 建立将并条机定性指标转换为定量指标, 并得出最佳设计方案的评价模型。**方法** 采用层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 和改进的加权灰色关联分析模型 (Grey Relational Analysis, GRA) 相结合的方法, 综合 2 种方法的各自优势, 以灰色关联分析为中心模型, 以 AHP 模型为辅助模型, 从造型、结构、体验 3 个方面综合考虑影响并条机的设计因素, 通过 AHP 模型和 Matlab 辅助计算来确定并条机基准层中每一个因素各关联系数的权重向量, 从而结合 GRA 计算出 3 个设计备选方案与最优方案的关联度, 实现对各方案的优先排序。**结论** 通过实例分析表明, 该方法可以评估并得出最佳的并条机设计方案, 其评估过程也更具客观性和准确性, 为制定后期其他设计方案提供量化分析参考。

关键词: 工业设计; 纺织机械; 并条机; 层次分析法; 灰色关联分析

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)04-0251-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.04.031

Design and Evaluation of Drawing Frame Based on AHP and Weighted Grey Relational Analysis

CHAI Min, MA Yu

(Tiangong University, Tianjin 300387, China)

ABSTRACT: In order to objectively evaluate the influence of qualitative index factors in the drawing frame on the drawing frame design and reduce subjective bias in the decision-making process of design scheme, an evaluation model was established to convert qualitative index into quantitative index of drawing frame and decide the best design scheme. By combining the analytic Hierarchy Process (AHP) with the improved Grey Relational Analysis (GRA), the respective advantages of the two methods were integrated. Taking the Grey Relational Analysis as the central model and the AHP model as the auxiliary model, the design factors affecting the drawing machine were comprehensively considered from the three aspects of modeling, structure and experience. The weight vector of each factor and each correlation coefficient in the reference layer of the drawing machine was determined through the AHP model and MATLAB auxiliary calculation. In this way, the correlation degree between the three design alternatives and the optimal scheme was calculated by combining GRA to realize the prioritization of each scheme. The application example shows that the method can be used to evaluate the best drawing frame design scheme, and the evaluation process is more objective and accurate, which provides quantitative analysis reference for other design schemes in later stage.

KEY WORDS: industrial design; textile machinery; drawing frame; AHP; GRA

并条机是一种改善纤维条均匀度, 并使其伸直、平行的纺织机械, 国内该产品日趋多样化, 但与具有先进设计理念、方法及技术的国外知名老牌纺机企业

相比, 国内产品仍呈现出显著的差距。并条机作为纺纱工艺流程中的重要部分, 其设计方案的评价与选择尤为重要。一个科学合理的设计方案, 在使用过程中

收稿日期: 2021-11-07

作者简介: 柴敏 (1995—), 男, 内蒙古人, 天津工业大学硕士生, 主攻工业设计工程。

通信作者: 马彧 (1962—), 男, 湖北人, 硕士, 天津工业大学教授, 主要研究方向为设计艺术学。

保证安全性和舒适性的同时,还需要保证造型的美观性^[1]。层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)是一种定性定量分析相结合的多准则决策方法,由美国著名的运筹学家 Satty 于 20 世纪 70 年代提出,其在解决复杂决策问题时具有很高的实用性和有效性,同时提供了一种可检查和评估措施一致性的有效机制^[2],近年在工业设计的决策中被广泛应用,如郭宏凌等根据层次分析法的基本原理提出了一种先进设计技术的分类标准^[3];田园等^[4]通过改进模糊 AHP 和主元分析法对高速自动机综合性能进行了评估;万强等^[5]借助 AHP 完成了机构方案的优化决策。然而,在设计实践中方案的选择上,AHP 很大程度会受到决策人经验、偏好等人为主观因素的影响,为有效降低影响,王森等^[6]运用 AHP 和群组决策特征根法(Group Eigenvalue Method, GEM)建立了驾驶舱人机界面评价指标体系,有效规避了决策过程的主观性;Tan 等提出了一个新的模糊 AHP 模型,对决策元素的成对比较用三角模糊数表示;Wang 等^[7]提出将模糊 AHP 和模糊 Kano 模型结合的方法,把用户偏好和感知融入产品的决策过程中;田广东等^[8]利用模糊 AHP 和灰色关联 TOPSIS 法对拆解方案的序列进行了综合评估。灰色系统理论是由我国著名学者邓聚龙教授于 1982 年提出的,其中的灰色关联分析(Grey Relational Analysis, GRA)是通过计算各方案与最优方案之间的关联程度对各方案进行优劣排序,其适用于处理小样本量且无典型分布规律的问题,近年来如张英莉等基于灰色层次关联分析方法进行了微博营销评估;王中等^[9]应用灰色关联分析理论提出了互联网产品用户体验度量的方法^[10];潘伟杰等应用灰色关联和 TOPSIS 相结合的方法,实现了用户多维意象特定要求下对备选设计方案的排序优选^[10]。上述文献一方面表明,虽然 AHP 可以得到指标因素的标度,但受人为主观因素影响很大,采取专家或者行业专门人士群体判断的方法可减小影响,另一方面,在纺机装备设计中缺乏对产品从多指标定量化角度来进行系统的科学评价和设计分析。

文中建立的并条机设计评价模型,采用 AHP 从美观性、安全性和用户体验 3 大影响因素综合考虑,建立阶层结构模型,确定基准层中各指标的权重向量,再通过改进的加权灰色关联分析方法^[11]计算出各方案与最优方案的关联度,对各方案进行优劣排序得到最佳的设计方案,并为并条机开发设计提供定量分析参考。

1 并条机设计评价流程

设计评价能更准确地反应设计的质量,通过合理的设计评价方法,能有效地进行方案的对比,提高产品的市场竞争力。并条机的设计受到众多因素的影响,需要在满足产品本身功能属性的前提下,再结合

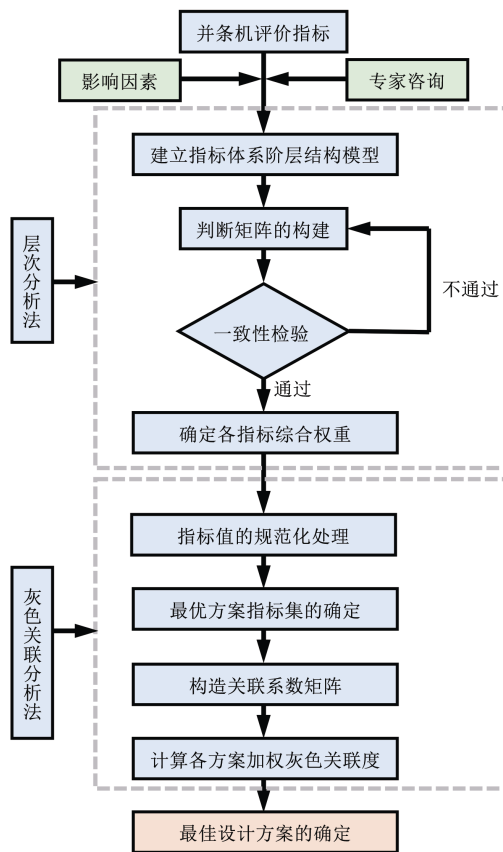


图 1 并条机设计方案评价流程

Fig.1 Evaluation process of drawing frame design scheme

艺术的表现手段对设备造型进行设计,以此达到实用、经济、美观的目的,其中结构布局、材料选用和工艺处理都是重要的因素。并条机设计方案评价流程见图 1。

2 基于 AHP 和加权灰色关联分析的评价模型构建

2.1 基于 AHP 的指标权重计算

AHP 是一种定性定量分析相结合的多准则、多目标的决策分析方法,它将处理目标问题的对象视为系统,按照分解、比较、判断、综合的思维方式来进行决策,其优点是所需要的定量数据不多,但对问题的本质、问题所涉及的因素,以及其内在关系的分析比较透彻、清楚。其基本原理是把决策的问题分解为不同层次的组成因素,并按照层次间的隶属关系及优劣关系形成多层次结构模型,专家依据一定标度对各个因素之间的相对重要度进行量化与判断,使专家意见变得客观化,构造出判断矩阵。最后,在此基础上计算出各因素指标的权重系数,具体步骤如下。

1) 评价指标层级模型构建。通过对并条机进行设计调研,搜集行业内专家及经验丰富的产品设计人员的意见,再查阅与研究相关文献资料,将并条机设计问题转换为目标层、基准层和方案层 3 个层次的阶

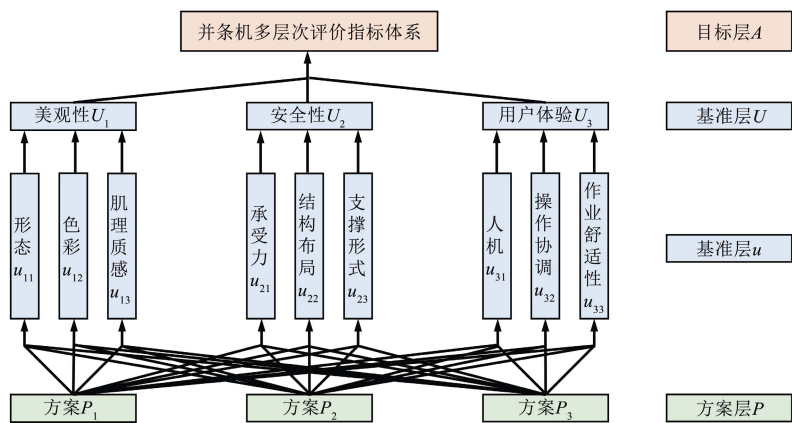


图 2 并条机评价指标体系
Fig.2 Evaluation index system of drawing frame

表 1 并条机设计评价指标说明

Tab.1 Description of design evaluation index of drawing frame

次基准层	指标说明
形态 u_{11}	并条机形态设计比例及风格整体统一，视觉均衡稳定
色彩 u_{12}	设计色彩是否符合当前审美趋势，是否合理，以及是否符合色彩搭配规律
肌理质感 u_{13}	并条机制造的表面处理工艺设计合理，低反光度，附着力好，硬度较高，不易刮花，不易褪色
承受力 u_{21}	单位面积的承受力符合并条机结构力学要求
结构布局 u_{22}	各功能机构的结构布局位置是否合理，安装拆卸是否简易，维修除尘是否方便
支撑形式 u_{23}	支撑结构形式具备的强度和韧性符合并条机的结构力学需求
人机 u_{31}	控制面板的设计是否符合人眼凝视视野视觉特性，铸件底座、门锁和把手的设计是否符合动态人体尺寸
操作协调 u_{32}	操作机器的功能引导设计是否符合人操作习惯，使操作协调
作业舒适性 u_{33}	操作机器方式设计是否符合人体生理结构，能否提高作业舒适性和操作效率

层结构模型。从产品的造型、结构、体验出发，将并条机的基准层划分为美观性 U_1 、安全性 U_2 、用户体验 U_3 共 3 个基准指标，根据以上 3 个方面划分出数个指标，再让专家在互不协商的情况下，对评价指标的重要性作出判断，经过多次反复的信息交换，统计最终得到的具有代表性的 9 项次基准评价指标，分别为形态 u_{11} 、色彩 u_{12} 、肌理质感 u_{13} 、承受力 u_{21} 、结构布局 u_{22} 、支撑形式 u_{23} 、人机 u_{31} 、操作协调 u_{32} 、作业舒适度 u_{33} 。确定基准层指标及次基准层指标后，先进行 3 个基准层指标之间的相互比较，再进行 9 个次基准层指标间的相互比较，最终构造并条机评价指标的阶层分析模型，见图 2。为了便于理解各个评价指标的含义，因此对各指标进行简单的说明释义，见表 1。通过对表 1 中的设计评价指标进一步分析可得，并条机评价指标体系存在较复杂的层次结构，而且各个指标之间也存在一定的关联性。例如，形态的确定与各功能机构的结构布局存在着较为密切的关系。由此可见，并条机评价指标体系是一种比较典型的灰色系统。

2) 判断矩阵的构建。判断矩阵表示相对上一层次的某个因素，确定本层次相关因素之间相对重要性的比较，采用的 1—9 级标度法对决策判断进行量化来表示 2 个评价指标间的不同重要性，构造判断矩阵

$A = (a_{ij})_{n \times n}$ 。在实际调研过程中，参与者只需要在问卷上勾选所对应的程度数字，操作简单且易被接受，具有较高的调研效率。标度及含义见表 2。

3) 层级中指标权重的计算。通过 Matlab 编写计算过程，计算判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}$ 及其对应的特征向量 w 。

4) 判断矩阵的一致性检验。计算随机一致性比率，此时 CR 如下：

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{1}$$

其中 RI 为随机一致性指标，具体数值见表 3。当 $CR < 0.1$ 时，认为矩阵 A 具有满意一致性，否则需

表 2 标度及含义
Tab.2 Scale and meaning

标度	含义
1	2 个因素相比较，具有相同重要性
3	2 个因素相比较，前者比后者稍微重要
5	2 个因素相比较，前者比后者明显重要
7	2 个因素相比较，前者比后者十分重要
9	2 个因素相比较，前者比后者极其重要
2、4、6、8	上述相邻判断的中间值
倒数	相同程度下，后者与前者比较

表3 随机一致性指标
Tab.3 Random consistency index

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.89	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

重新修正判断矩阵。经过一致性检验后计算各级子指标的综合权重 $\mathbf{W}$ 并进行层次总排序。

2.2 基于 GRA 的关联度计算

GRA 可定量分析 2 个因素之间的相互关联度,其本质是利用数据序列曲线间的相似程度进行分析比较,以此判断其联系的紧密程度,即几何形状越相似,关联程度越大,反之越小。其基本步骤如下。

假设并条机设计方案决策系统由 m 个方案和 n 个指标所构成,则第 i 个方案的 n 个指标值可构成集合 $\mathbf{X}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}) (i=1, 2, \dots, m)$, 根据 m 个方案的 n 个原始指标值可构成如下原始方案指标矩阵 $\mathbf{X}$:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \mathbf{X}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{X}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.2.1 指标值的规范化处理

在实际所得的数据中,通常不同因素的数据具有不同的量纲,故不能直接比较,为消除量纲的影响,采用极值化的方法对矩阵 $\mathbf{X}$ 进行规范化处理。设 $M_k = \max(x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{mk}) (k=1, 2, \dots, n)$, $m_k = \min(x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{mk}) (k=1, 2, \dots, n)$, 则有新的标记符号如下。

对于消耗性指标:

$$x_{mk}^* = \frac{M_k - x_{mk}}{M_k - m_k} \quad (3)$$

对于收益性指标:

$$x_{mk}^* = \frac{x_{mk} - m_k}{M_k - m_k} \quad (4)$$

于是可得到方案指标规范化矩阵 $\mathbf{X}_m^*$ 如下:

$$\mathbf{X}_m^* = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1^* \\ \mathbf{X}_2^* \\ \vdots \\ \mathbf{X}_m^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11}^* & x_{12}^* & \cdots & x_{1n}^* \\ x_{21}^* & x_{22}^* & \cdots & x_{2n}^* \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1}^* & x_{m2}^* & \cdots & x_{mn}^* \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.2.2 最优方案指标集的确定

取最优方案指标集 $\mathbf{X}_0 = (x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n})$, 其中 $x_{0j} (j=1, 2, \dots, n)$ 为第 j 个指标的最优值。当评价指标取值为越小越好的消耗性指标时, $x_{0j} = \min(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})$; 当评价指标取值为越大越好的收益性指标时, $x_{0j} = \max(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})$ 。同样对其 n 个指标值极值化处理,则可以得到集合 $\mathbf{X}_0^* = (x_{01}^*, x_{02}^*, \dots, x_{0n}^*)$, 由此可构造带最优解的方案指标规范化矩阵 $\mathbf{X}^*$ 如下:

$$\mathbf{X}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_0^* \\ \mathbf{X}_1^* \\ \mathbf{X}_2^* \\ \vdots \\ \mathbf{X}_m^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{01}^* & x_{02}^* & \cdots & x_{0n}^* \\ x_{11}^* & x_{12}^* & \cdots & x_{1n}^* \\ x_{21}^* & x_{22}^* & \cdots & x_{2n}^* \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1}^* & x_{m2}^* & \cdots & x_{mn}^* \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.2.3 关联系数矩阵的构造

第 i 个方案的第 j 个指标与最优方案的第 j 个指标的关联系数 ε_{ij} 此时如下:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\min_i \min_j |x_{0j}^* - x_{ij}^*| + \rho \max_i \max_j |x_{0j}^* - x_{ij}^*|}{|x_{0j}^* - x_{ij}^*| + \rho \max_i \max_j |x_{0j}^* - x_{ij}^*|} \quad (7)$$

式中 ε_{ij} 是第 i 个方案与最优方案在第 j 个指标处的相对差值,描述了 $\mathbf{X}_i$ 对 $\mathbf{X}_0$ 的影响程度,称之为 $\mathbf{X}_i$ 与 $\mathbf{X}_0$ 在第 j 个指标处的关联度。式中 ρ 为分辨系数, $\rho \in [0, 1]$, 常取 $\rho = 0.5$ 。综上可得关联系数矩阵 $\mathbf{E}$ 如下:

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_1 \\ \mathbf{E}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{E}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \cdots & \varepsilon_{1n} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \cdots & \varepsilon_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varepsilon_{m1} & \varepsilon_{m2} & \cdots & \varepsilon_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

2.2.4 加权灰色关联度的确定

各子指标的综合权重 $\mathbf{W} = (w_1, w_2, \dots, w_n)$, 满足 $w_i \geq 0$, $\sum_{i=1}^n w_i = 1$, $\mathbf{R}_i (i=1, 2, \dots, m)$ 为 $\mathbf{X}_i$ 对 $\mathbf{X}_0$ 的关联度。根据关联系数行向量 $\mathbf{E}_i$ 和指标权重向量 $\mathbf{W}$ 可得如下各方案关联度:

$$\mathbf{R}_i = \mathbf{E}_i \times \mathbf{W} = [\varepsilon_{i1}, \varepsilon_{i2}, \dots, \varepsilon_{in}] \times \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

关联度 $\mathbf{R}_i$ 反映了 $\mathbf{X}_i$ 与 $\mathbf{X}_0$ 之间关系的密切程度,因此可按照关联度大小排序得到各方案的优劣排序。

3 实例分析

3.1 实例概况

某纺机装备企业并条机工程项目招标,需要对 JWF1317 并条机进行设计改进。将 JWF1317 并条机与其家族化产品外观形态进行对比分析,提取产品族元素特征,通过 45°切角、折线元素等造型特征的运用来表现设备造型形态,体现企业品牌文化;并结合人机工程学与美学设计法则等理论进行优化设计,使并条机的设计在保证结构和功能稳定的同时,提升其易用性和美观性。

人机关系因素在纺机设备设计中的用户体验方面有着非常重要的作用。针对产品现状进行分析,提供更符合人机工程学的设计,比如在机器设备高度一

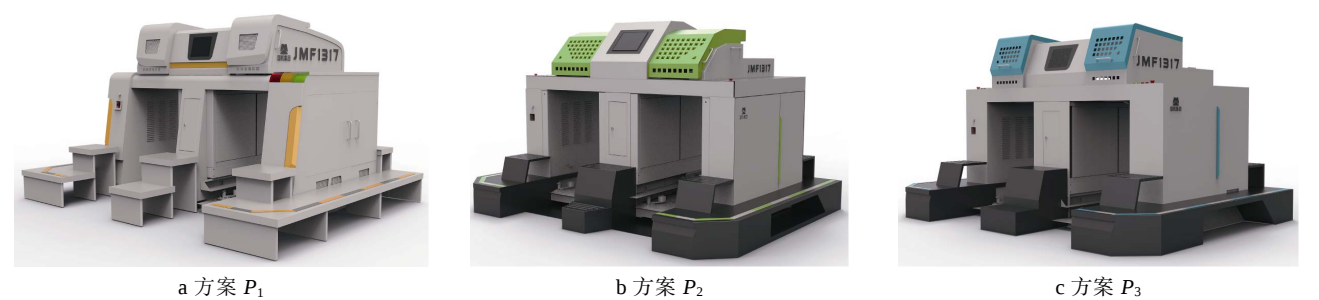


图 3 3 种不同的设计方案
Fig.3 Three different designs

定的情况下，根据人体尺寸数据，把手的安装高度应该选取人身高的 50%作为设计依据，以适合不同身高的人操作使用^[12]；把手的尺寸大小也会影响人体的基本操作，把手过大会增加操作者使用过程中握力消耗，易产生身体上的疲劳感；把手过小会使操作者握持时与手面接触小而造成不适感和疼痛感。其他方面如控制面板的设计要求符合人眼静视野视觉特性，铸件底座、门锁的设计符合动态人体尺寸。

最后得到备选方案 P_1 、 P_2 、 P_3 ，各方案整体形态均以稳定为设计要点，满足用户心理安全感的需求；操作界面采用多点触屏控制系统，便于用户调整设备参数，提升工作效率。使用 Rhino 三维建模软件进行计算机辅助设计，用 Keyshot 软件进行效果图渲染，最终得到并条机造型设计方案效果，见图 3。

方案 P_1 整体以圆润的弧形为主要设计元素，牵伸机构罩壳采用了弧线、圆角进行设计，塑造了一种饱满且富有张力的设计风格。中段同样以半弧形形态与顶部牵伸机构罩壳相呼应，使整体更加协调，其中嵌入式的黄色结构装饰条使其形态更丰富。底座的设计为直板几何的叠加，表现以理性、稳重和端庄的感觉，并增加黄黑色装饰线的设计。该方案主色为浅灰色，辅助色为深灰色和橙黄色。前脸造型与垂直面有一定的倾斜角度，圆润的造型设计虽更具美观性，但在操作实践中增大了操作者的手臂工作范围，易产生疲劳。

方案 P_2 整体主要以直线、直面、直角和斜角为设计元素，其设计风格硬朗厚重、简洁有力。牵伸前罩壳的通风孔运用 45° 元素对其重新排列分割，触控屏幕的外侧添加黑色外框增加层次感。底座以结构铸件为基础，结合直角、斜角、 45° 设计元素进行镂空和分割，丰富了产品形态，并增加绿白色装饰线的设计。该方案主色为浅灰色，辅助色为深灰色和绿色，整体造型硬朗，安全性较高，保留了传统纺机设备的机械感，但美观性相对较差。

方案 P_3 牵伸机构罩壳以微弧形的线、直角、圆角和斜角为设计元素，结合方案 P_1 和方案 P_2 各自一部分特点，塑造了一种硬朗中略带圆润的设计风格。顶部采用轴式翻盖的开启结构，方形触控屏幕的外侧添加了圆角梯形的黑色外框。铸件底座通过镂空和切

割的方式重新进行了设计，方便用户上下操作台，减少体力消耗，并增加了蓝白装饰线。该方案主色为浅灰色，辅助色为深灰色和蓝色。前脸保留了部分圆润的造型和硬朗的中段，对设备的安全性和美观性进行了均衡。

3.2 AHP 确定指标权重的计算

根据 6 位行业内专家及经验丰富的产品设计人员的意见，依据上述的递阶层次结构模型和判断原理，采用 1—9 标度法对并条机 3 个基准层指标进行相互比较，再对 9 个次基准层指标进行相互比较，以此构造判断矩阵，利用 Matlab 求出各指标归一化权重；再对各判断矩阵进行一致性检验，计算出各判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max}$ 、一致性指标 CI 和一致性比率 CR，见表 4—7。

一致性检验通过后，计算各级子指标的综合权重 W 并进行层次总排序，见表 8。据表中数据可知，用

表 4 基准层指标判断矩阵 Tab.4 Benchmark level index judgment matrix					
	U_1	U_2	U_3	归一化权重	一致性检验
U_1	1	1/7	1/3	0.081	$\lambda_{\max}=3.056$
U_2	7	1	5	0.731	CI=0.333
U_3	3	1/5	1	0.188	CR=0.056

表 5 美观性下的次基准层指标判断矩阵 Tab.5 The judgment matrix of the index of subbase layer under aesthetics					
	u_{11}	u_{12}	u_{13}	归一化权重	一致性检验
u_{11}	1	3	5	0.637	$\lambda_{\max}=3.038$
u_{12}	1/3	1	3	0.258	CI=0.019
u_{13}	1/5	1/3	1	0.105	CR=0.033

表 6 安全性下的次基准层指标判断矩阵 Tab.6 The index judgment matrix of sub-base layer under security					
	u_{21}	u_{22}	u_{23}	归一化权重	一致性检验
u_{21}	1	5	1/3	0.279	$\lambda_{\max}=3.065$
u_{22}	1/5	1	1/7	0.072	CI=0.033
u_{23}	3	7	1	0.649	CR=0.056

表 7 用户体验下的次基准层指标判断矩阵
Tab.7 The sub-baseline index judgment matrix under user experience

	u_{31}	u_{32}	u_{33}	归一化权重	一致性检验
u_{31}	1	3	5	0.637	$\lambda_{\max}=3.038$
u_{32}	1/3	1	3	0.258	CI=0.019
u_{33}	1/5	1/3	1	0.105	CR=0.033

表 8 各级子指标的综合权重及总排序
Tab.8 The comprehensive weight and total ranking of each sub-index

	美观性 U_1 0.081	安全性 U_2 0.731	用户体验 U_3 0.188	综合 权重 W_T	总排序
形态 u_{11}	0.637			0.052	5
色彩 u_{12}	0.258			0.021	7
肌理质感 u_{13}	0.105			0.008	9
承受力 u_{21}		0.279		0.204	2
结构布局 u_{22}		0.072		0.053	4
支撑形式 u_{23}		0.649		0.474	1
人机 u_{31}			0.637	0.120	3
操作协调 u_{32}			0.258	0.048	6
作业舒适性 u_{33}			0.105	0.020	8

表 9 各子指标专家评分表
Tab.9 The comprehensive weight and total ranking of each sub-index

子指标 U_i	方案 P_1	方案 P_2	方案 P_3
形态 u_{11}	80	85	83
色彩 u_{12}	80	90	84
肌理质感 u_{13}	85	86	86
承受力 u_{21}	90	90	89
结构布局 u_{22}	94	85	95
支撑形式 u_{23}	78	95	85
人机 u_{31}	68	78	95
操作协调 u_{32}	73	82	87
作业舒适性 u_{33}	85	83	84

户对于并条机的安全性最为重视，其次是用户体验，最后是美观性。安全性中支撑形式因素的权重值最高，用户体验中人机因素最重要，美观性中形态的权

重最大。由此可见，对于并条机的设计，用户更希望产品具有更高的安全性，在支撑形式设计上，能够保证用户操作安全的同时，还要保证心理安全，避免产生心理负担，影响工作效率；在提升用户的人机体验方面，主要包括控制面板、铸件底座、门锁与把手的设计，控制面板尺寸要符合人体各部分的生理特点，应充分考虑人体立姿眼高、立姿肘高及人眼最佳观察范围，而铸件底座的高度、门锁与把手的安装高度的设计，要以抬腿高度、立姿肘高和人手操作范围为参考依据。

综上，则有 $W = (0.052, 0.021, 0.008, 0.204, 0.053, 0.474, 0.120, 0.048, 0.020)^T$ 。

3.3 GRA 确定关联度的计算

邀请 6 位专家依次对 3 个设计方案进行评分，因篇幅有限，文中只给出 1 位专家打分表，见表 9。

根据下式（10）可求得各指标均值，将 3 个设计方案的各指标均值作为原始指标值，依据式（2）可构造矩阵 X 如下：

$$\bar{x} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 x_i \tag{10}$$
$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 74 & 73 & 64 & 78 & 79 & 75 & 71 & 71 & 73 \\ 73 & 77 & 72 & 77 & 78 & 81 & 74 & 75 & 76 \\ 76 & 72 & 72 & 78 & 80 & 79 & 78 & 81 & 80 \end{bmatrix}$$

上述 9 项次基准评价指标皆为取值越大越好的收益性指标，因此可确定并条机的最优方案指标集 $X_0 = (76, 77, 72, 78, 80, 81, 78, 81, 80)$ ，采用数据极值化的方法对矩阵 X 进行规范化处理，根据式（3）、式（4）、式（5）和式（6）可得矩阵 X^* 如下：

$$X^* = \begin{bmatrix} X_0^* \\ X_1^* \\ X_2^* \\ X_3^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.333 & 0.2 & 0 & 1 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0.429 & 0.4 & 0.429 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0.667 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

可求得 $\min_i \min_j |x_0^*(j) - x_i^*(j)| = 0$ ， $\max_i \max_j |x_0^*(j) - x_i^*(j)| = 1$ ，常取 $\rho = 0.5$ ，据式（7）可得：

$$\varepsilon_{ij} = \frac{0.5}{|x_0^*(j) - x_i^*(j)| + 0.5}$$

根据式（8）可得关联系数矩阵 E ：

$$E = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.428 & 0.385 & 0.333 & 1 & 0.5 & 0.333 & 0.333 & 0.333 & 0.333 \\ 0.333 & 1 & 1 & 0.333 & 0.333 & 1 & 0.467 & 0.455 & 0.467 \\ 1 & 0.333 & 1 & 1 & 1 & 0.6 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

根据式（9）可求得各方案的关联度：

$$R = E \times W = \begin{bmatrix} 0.428 & 0.385 & 0.333 & 1 & 0.5 & 0.333 & 0.333 & 0.333 & 0.333 \\ 0.333 & 1 & 1 & 0.333 & 0.333 & 1 & 0.467 & 0.455 & 0.467 \\ 1 & 0.333 & 1 & 1 & 1 & 0.6 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.052 \\ 0.021 \\ 0.008 \\ 0.204 \\ 0.053 \\ 0.474 \\ 0.120 \\ 0.048 \\ 0.020 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.484 \\ 0.693 \\ 0.796 \end{bmatrix}$$

综上可知, $R_3 > R_2 > R_1$, 方案 P_3 与最优方案关联程度最大, 其优劣排序为方案 $P_3 > P_2 > P_1$, 因此选择 P_3 为最佳设计方案。

4 结语

该评价模型将并条机设计方案的决策系统视为一个灰色系统, 运用 AHP 建立了并条机设计评价的指标体系, 从美观性、安全性、用户体验 3 个方面确定了 9 个次基准评价指标, 并计算出各级指标权重, 通过一致性检验后, 计算出各级子指标的综合权重并进行层次总排序; 借助加权灰色关联度分析的方法求解各方案与最优方案的关联度, 实现对各方案的优先排序, 分别为 0.484、0.693、0.796, 因此 P_3 为最佳设计方案。经过设计实践证明, 纺织机械行业专家和实际操作人员根据安全、易加工、低成本等要求做出的实际选择, 与基于 AHP 和加权灰色关联分析方法的并条机设计评价模型的评价结果相同, 方案 P_3 最为符合企业的策略要求。以上表明了该评价模型的有效性和合理性, 实现了并条机最佳设计方案的选择, 解决了并条机中定性指标对其设计影响程度量化的问题, 为制定后期其他设计方案提供了量化分析参考。在确定各指标权重过程中, 专家的意见仍存在一定的主观性, 因此该方面是后续改进的研究重点; 其次在后续的研究中, 还需要进行并条机在实际转化过程中的市场满意度的评价, 以进一步说明前期方案评价和选择的合理性。

参考文献:

- [1] 王年文, 王剑. 基于模糊综合评价的动态踝足矫形器设计评价研究[J]. 机械设计, 2019, 36(05): 139-144.
WANG Nian-wen, WANG Jian. Design and Evaluation of Dynamic Ankle-foot Orthosis Based on Fuzzy[J]. Mechanical Design, 2019, 36(5): 139-144.
- [2] CHEN Mei-fang, TZENG G H, DING C G. Combining Fuzzy AHP with MDS in Identifying the Preference Similarity of Alternatives[J]. Applied Soft Computing Journal, 2006, 8(1): 110-117.

- [3] 郭弘凌, 田怀文, 柯小甜. 基于层次分析法和相关性矩阵的先进设计技术分类方法[J]. 机械设计与研究, 2016, 32(1): 1-5.
GUO Hong-ling, TIAN Huai-wen, KE Xiao-tian. Advanced Design Technology Classification Based on AHP and Correlation Matrix[J]. Machine Design & Research, 2016, 32(1): 1-5.
- [4] 田园, 潘宏侠, 张媛, 等. 基于 PCA 与改进 F-AHP 的高速自动机组合灰评估[J]. 机械设计与研究, 2016, 32(3): 174-177.
TIAN Yuan, PAN Hong-xia, ZHANG Yuan, et al. A New Algorithm for Grey Evaluation of High-speed Automaton Based on PCA and Improved F-AHP[J]. Machine Design & Research, 2016, 32(3): 174-177.
- [5] 万强, 林松, 任子文. 基于形态学与层次分析法的机构创新设计[J]. 机械设计与研究, 2013, 29(3): 6-8.
WAN Qiang, LIN Song, REN Zi-wen. Mechanism Design Based on Morphology Matrix and Analytic Hierarchy Process[J]. Machine Design & Research, 2013, 29(3): 6-8.
- [6] 王淼, 余隋怀, 杨延璞. 基于 AHP-GEM 模糊分析的飞机驾驶舱人机界面评价[J]. 机械设计, 2017, 34(2): 105-109.
WANG Miao, YU Duo-huai, YANG Yan-pu. Human-machine interface evaluation of aircraft cockpit based on Fuzzy AHP-GEM[J]. Journal of Machine Design, 2017, 34(02): 105-109.
- [7] WANG C H, WANG J. Combining Fuzzy AHP and Fuzzy Kano to Optimize Product Varieties for Smart Cameras: a Zero-one Integer Programming Perspective[J]. Applied Soft Computing Journal, 2014, 22: 410-416.
- [8] 田广东, 张洪浩, 王丹琦. 基于模糊 AHP—灰色关联 TOPSIS 的拆解方案评估研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(5): 34-40.
TIAN Guang-dong, ZHANG Hong-hao, WANG Dan-qi. Disassembly Program Evaluation Research Based on Fuzzy AHP, Grey Correlation and TOPSIS Combined Approach[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(5): 34-40.

(下转第 301 页)