

基于 AHP-熵权法的电火花线切割机床设计

尹浩东, 胡光忠, 张玲玉, 余洁
(四川轻化工大学, 宜宾 644000)

摘要: **目的** 为了研究并解决电火花线切割机床在设计中存在的问题, 反映技术人员对机床设计的满意度。**方法** 通过 AHP 和熵权法对评价指标赋权, 搭建模糊评价模型; 通过调研和专家意见, 从技术人员物理尺度、安全性、功能与操作、美学和操作人员期望等 5 个层面建立评价指标体系; 运用 AHP 层次分析法进行主观权重分析, 通过熵权法对指标进行客观权重分析, 最后通过模糊综合评价法对设计满意度进行评价。**结果** 以机床操作人员的需求为基础, 通过对专家和技术人员调研数据的分析, 设计了较为完善的电火花线切割机床。**结论** AHP-熵权法较大程度地保留了技术人员的客观评价和行业专家的主观判断, 体现了主客观相结合赋权的科学性。评价模型为机床外观设计的改进提供了理论依据和量化指标, 同时对提升技术人员操作满意度具有重要作用。

关键词: 电火花线切割机床; 满意度; AHP-熵权法; 评价模型

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)06-0125-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.06.017

Design and Evaluation of Wire EDM Based on AHP-Entropy Method

YIN Hao-dong, HU Guang-zhong, ZHANG Ling-yu, YU-Jie
(Sichuan University of Science & Engineering, Yibin 644000, China)

ABSTRACT: In order to study the problems existing in the design of wire-cut EDM, reflect the satisfaction of technicians to the design of wire-cut EDM. The evaluation index is weighted by AHP and entropy method, and a fuzzy evaluation model is built. According to the investigation and expert opinions, an evaluation Index system is established from Physical scale of technicians, safety, function and operation, aesthetics and operator expectation. Through the subjective weight is analyzed by AHP analytic hierarchy process, the objective weight is analyzed by entropy weight method, and the design satisfaction is evaluated by fuzzy comprehensive evaluation method. Based on the needs of machine tool operators, a relatively complete WEDM machine has been designed through analysing the research data, AHP-Entropy method retains the objective evaluation of technicians and the subjective judgment of experts, embodies the scientific nature of the combination of subjective and objective weighting, and plays an important role in improving the appearance design of machine tools and providing theoretical basis and quantitative indicators for improving the operation satisfaction of technicians.

KEY WORDS: wire EDM; satisfaction; AHP-entropy method; model evaluation

随着时代的发展, 科技的不断进步, 电火花线切割机床的运用越来越广泛。电火花线切割机床是半导体与其他特种材料切割、模具加工、高精密零部件加工的重要工具, 对其进行设计研究具有重要的意义。

在国内, 刘志东^[1]教授提出了机床节能环保的运

用, 对工作液系统进行了再设计, 加装了防护罩, 从而防止工作液飞溅和雾化, 为技术人员创造了一个更加环保的操作环境。谢东和^[2]将机床对产品、模具等加工精度作为研究的重点, 从而进一步优化加工工艺。饶佩明等^[3]通过对机床智能化张力控制系统的研

收稿日期: 2021-12-28

作者简介: 尹浩东 (1993—), 男, 硕士, 主要研究方向为用户研究与产品设计。

通信作者: 胡光忠 (1972—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为现代设计理论与方法。

究,控制走丝机构的稳定性,从而提高表面切割精度和切割效率。在国外, Priyaranjan Sharma 等^[4]为了研究 WEDM 机械加工表面的冶金学变化,通过机床加工高精密工件,运用方差分析,确定重要控制参数。S. Senkathir R. Aravind 等^[5]通过对人工神经网络(ANN)模型和多响应优化技术的研究,预测和选择线切割工艺(WEDM)的最佳切削参数。可以发现,国内对电火花线切割机张力结构、加工工艺、机床的未来发展趋势等的研究比较深入,而国外对机床的高精密加工,建立数学模型控制参数设置等的研究比较深入。在机床设计研究中,对机床技术人员操作的安全性问题、操作人员与机床的人机尺度问题、操作的便捷性等问题研究比较欠缺。

近几年来,在新产品原始开发设计研究中,AHP和熵权法涉及的方面比较广泛。李静等^[6]在儿童早教机产品设计研发时,通过AHP与模糊综合评价法的结合,让方案评价和方案优选更高效。宋端树等^[7]研究以老年人用户群体为目标的自行车外观造型时,通过AHP与感性工学的结合,将用户需求以量化的形式呈现出来。王颖^[8]运用熵权法与灰关联技术主观评价与客观评价的结合,解决了视频质量难以评估的问题。Song Wenyan 等^[9]通过建立AHP和TOPSIS方案决策模型,以量化的形式解决了评价信息的模糊性问题。姚忠^[10]通过熵权法模型的运用,优化切割参数,提高切割精度。张军等^[11]为了降低机器人设计过程中评价的主观性,建立了熵权法与FAHP相结合的评价模型。邬锦雯^[12]通过眼动实验获取观察者实验数据,

运用熵权法对数据进行分析验证设计的合理性。在研究电火花线切割机床时,运用AHP进行主观评价赋权,通过熵权法对指标进行客观评价赋权,具有理论指导依据。然后构建模糊综合评价模型对操作人员满意度进行评价,这种主客观相结合的评价方式解决了单方面从“主观评价”或“客观评价”赋权模型的不足之处,证明了评价模型具有实用性和可行性。

1 电火花线切割机床评价模型

1.1 研究技术路线

利用AHP主观权重分析方法,经专家学者对指标数据进行评分,获得指标两两比较的判断矩阵,对比分析得到主观评价结果。通过熵权法的客观权重方法,技术操作人员对指标进行评价打分,获得各级指标权重向量(客观权重)。经过专家建议,AHP与熵权法指标数据的重要性比例为3:7,从而得到AHP-熵权法综合评价权重指标数据。为了进一步验证专家意见及AHP-熵权法研究方法的准确性和实用性,运用模糊综合评价法对其再判断。通过李克特量表,得到技术操作人员对线切割机床设计满意度的评分,从而建立指标层评价矩阵和准则层评价矩阵,通过最大隶属度原则来评价机床设计的满意度。通过分析最终得到的结论,以量化的方式证明了AHP-熵权法在机床设计中运用的可行性。该方法有助于机床设计研究以更高的效率进行,技术路线见图1。

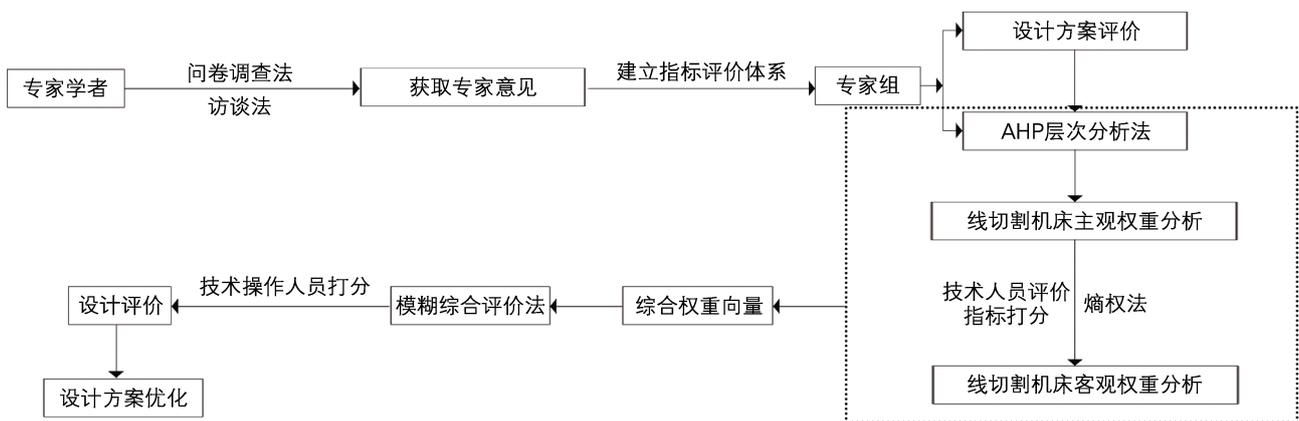


图1 技术路线
Fig.1 Technical route

1.2 构建评价指标体系

电火花线切割机床结构比较复杂,主要由走丝机构、机床床身、模具工作液系统、操作界面、三轴坐标台等组成。在搭建指标评价体系时,需要更加系统全面地构建指标体系^[13]。根据专家意见和查阅相关文献确定线切割机床评价指标,然后对指标进行综合性分类处理,形成指标层、准则层和目标层,从而建立线切割机床指标评价体系。通过问卷调查法和访谈法

等调研方式,获取专家学者的建议,得到调查问卷12份,其中有效调查问卷10份。通过对调查问卷可信度、校度检验等进行分析,提炼出5项评价准则,分别是物理尺度、安全性、功能与操作、美学、操作人员期望。准则层包含指标层,通过层次分析法(AHP)构建目标层(A)、准则层($B_1—B_5$)、指标层($C_1—C_{25}$)3个层级的操作人员机床设计评价指标体系见图2。

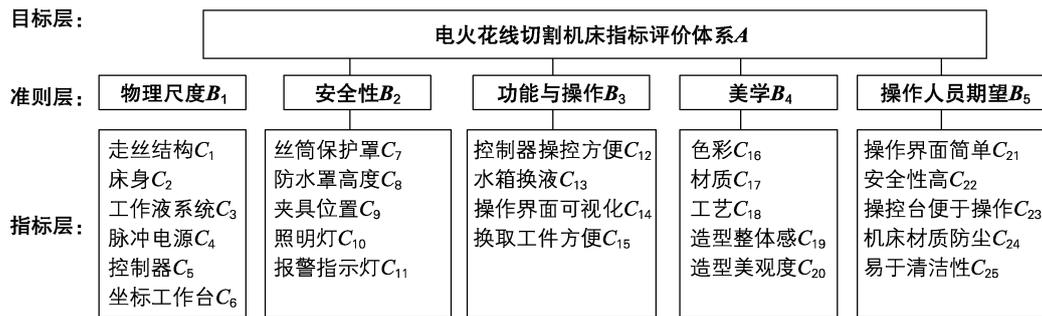


图 2 评价指标体系
Fig.2 Evaluation index system

1.3 AHP-熵权法指标权重计算

通过综合运用 AHP-熵权法，能够高效地应对由于指标的差异性所带来的权重计算难题，以定量的方式解决无法直接决策的问题，从而提升了评价过程的可信度。

1.3.1 AHP 权重计算

AHP 对问题进行分解、判断和综合统一，系统化决策复杂数据问题^[14]。每个环节都能够将复杂的信息、数据等量化计算，详细的过程如下所述。

1) 构建判断矩阵。为了获取同一个层级中评价指标两两之间的判断矩阵，首先由行业专家学者对各个指标进行评分，并且描述其相对重要程度。然后通过运用 1~9 标度法对指标进行分析，见表 1，指标得到的数值越高，其相对重要性越高，再通过构建两两比较判断矩阵的方式对指标进行运算，见表 2。

表 1 1~9 标度值及含义
Tab.1 1~9 Scale value and meaning

标度值	重要程度	具体含义
1	同等重要	评价指标 A 和 B 同等重要
3	稍微重要	评价指标 A 比 B 稍微重要
5	明显重要	评价指标 A 比 B 明显重要
7	强烈重要	评价指标 A 比 B 强烈重要
9	绝对重要	评价指标 A 比 B 绝对重要
2,4,6,8	中间值	重要程度介于两者之间

表 2 两两比较判断矩阵
Tab.2 Pairwise comparison judgment matrix

目标层 A	准则层 B ₁	准则层 B ₂	准则层 B ₃	...	准则层 B _N
准则层 B ₁	1	a ₁₂	a ₁₃	...	a _{1N}
准则层 B ₂	a ₂₁	1	a ₂₃	...	a _{2N}
准则层 B ₃	a ₃₁	a ₃₂	1	...	a _{3N}
...
准则层 B _N	a _{N1}	a _{N2}	a _{N3}	...	1

其中，A 表示评价指标，则：

$$a_{ij} = B_i / B_j \tag{1}$$

2) 基于特征根法求解判断矩阵。设 A-B 判断矩

阵为 A，可以利用式(2)求取 A 的特征根 λ。

$$A\omega = \lambda \max \omega \tag{2}$$

3) 一致性检验。CI 作为判断矩阵 A-B 的一致性指标，其计算见式(3)^[15]。

$$M_{CI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \tag{3}$$

同时，通过量化的方式，去检查判断矩阵的一致性。CR 表示一致性检验，RI 表示随机性指标，其具体数值见表 3。如果 CR<0.1，则表明一致性检测结果符合要求，其计算见式(4)。

$$M_{CR} = \frac{M_{CI}}{M_{RI}} \tag{4}$$

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

n	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

1.3.2 熵权法介绍

熵权法^[16]通过对指标定性的计算，得到指标的权重大小。“熵”表示信息的差异化程度。熵权法的过程如下所述。

1) 通过假设指标体系包含 m 个样本，n 项指标，则原始矩阵为：

$$R = (r_{ij})_{n \times m}, i = 1, 2, \dots, m \tag{5}$$

式中：r_{ij} 表示第 j 个指标基于第 i 项的标准数值，r_{ij} 的数值与效果好坏程度成正比，数值越大效果越好。

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \tag{6}$$

相反，数值越小意味着效果越好，那么：

$$r_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \tag{7}$$

2) 原始矩阵 R 的标准化，表示为：

$$p = (p_{ij})_{n \times m} \tag{8}$$

其中：

$$p_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^m r_{ij}} \quad (1 \leq j \leq m) \tag{9}$$

3) 熵的表达。定义指标 i 的熵值, 计算见式(10)。

$$e_i = -\frac{1}{\ln m} \sum_{j=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (1 \leq j \leq m) \quad (10)$$

当 $p_{ij}=0$ 时, 则定义:

$$\lim_{p_{ij} \rightarrow 0} p_{ij} \ln p_{ij} = 0 \quad (11)$$

4) 计算第 i 个指标的熵权 u_i , 具体见式(12)。

$$u_i = \frac{1-e_i}{\sum_{i=1}^n (1-e_i)} \quad (1 \leq j \leq n) \quad (12)$$

1.3.3 综合权重

通过 AHP 求得权重向量 w^1 与熵权法得到的权重向量 u^1 (根据专家建议 AHP 中 w^1 的权重比例系数取 0.3, 熵权法 u^1 权重比例系数取 0.7), 形成线性综合权重向量:

$$w = 0.3w^1 + 0.7u^1 \quad (13)$$

1.3.4 模糊综合评价

电火花线切割机床设计评价指标并不单一, 对多指标, 多层次数据, 需要构建模糊综合评价模型进行求解, 通过创建指标矩阵对准则层进一步运算, 再通过准则层评价矩阵得到目标层评价结果, 设定评语集

$V=\{v_1, v_2, \dots, v_k\}$ 和因素集 $U=\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, 由低层级指标创建评价矩阵, 其中因素集指标为 $u_i (i=1, 2, \dots, n)$, 从而判断评语集 V 中各评语隶属度 r_{ij} , 同时做归一化处理。评价矩阵 $R=(r_{ij})_{n \times k}$ 由各个因素构成, 权重向量 w 和评价矩阵 R 通过模糊评价计算, 获得的结果为:

$$s = wR = (w_1, w_2, \dots, w_n) \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1k} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2k} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nk} \end{pmatrix} \quad (14)$$

对指标层评价结果进行分析, 对准则层进行加权计算, 通过最大隶属度原则, 评价电火花线切割机床设计满意度。

2 电火花线切割机床评价实例

2.1 设计满意度调查

对设计的线切割机床进行满意度调查评价, 从物理尺度、安全性、功能与操作、美学、操作人员期望等方面进行调查, 获得操作者对设计作品的有效数据。电火花线切割机床设计见图 3。

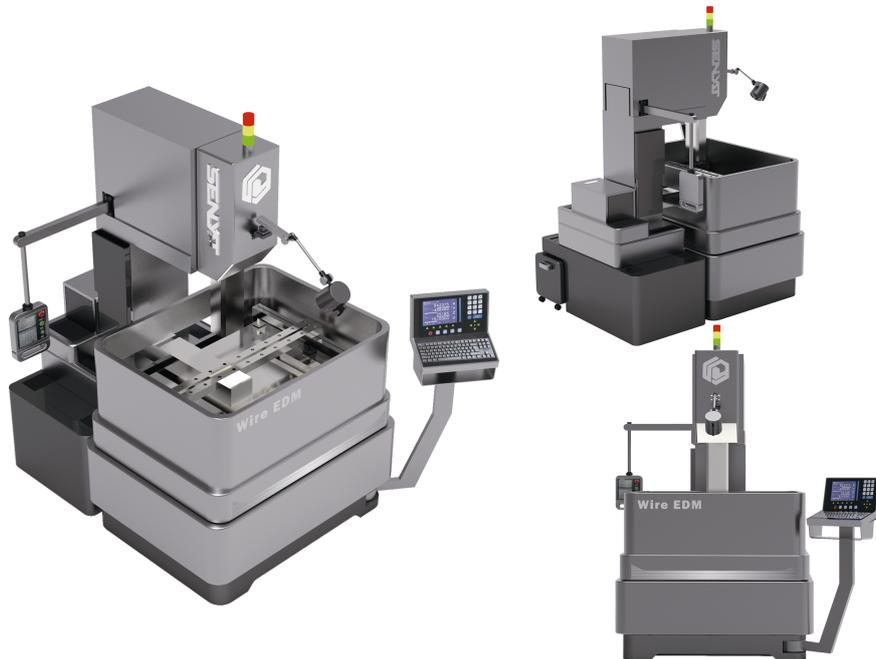


图3 电火花线切割机床设计
Fig.3 Design of WEDM machine tool

首先将评价指标制成李克特量表调查问卷, 问卷内容包括被测人员的基本信息和指标相对应的具体问题, 如设计效果是否满意。设置评语集 $V=\{\text{非常不满意, 比较不满意, 一般, 比较满意, 非常满意}\}$, 对应 1~5 分。邀请技术操作人员进行打分评价, 每位被测对象观察 5 min, 在测试完成前 5 min 分发调查问卷, 被测对象完成答题后收回, 有效问卷 10 份,

通过计算 Cronbach α 值为 0.96 (>0.95), 从而证明获取的调查数据有比较好的可信度。

2.2 各级指标综合权重计算

2.2.1 AHP 指标权重求解

首先通过 15 位专家对各个指标的重要程度进行判定, 然后将得到的数据创建指标层和准则层的

判断矩阵，再根据 AHP 权重计算方法，求解指标 w^1 。各指标层的权重见表 4—8，准则层的权重见层的权重向量 $w_1^1, w_2^1, w_3^1, w_4^1, w_5^1$ 及准则层的权重向量 表 9。

表 4 物理尺度 B_1 准则层下各评价指标权重值
Tab.4 The weight value of each evaluation index under the criterion layer of physical scale B_1

物理尺度 B_1	走丝结构 C_1	床身 C_2	工作液系统 C_3	脉冲电源 C_4	控制器 C_5	坐标工作台 C_6	权重	一致性指标 CI	检测系数 CR
走丝结构 C_1	1	2	3	4	5	6	0.38		
床身 C_2	1/2	1	2	3	4	5	0.25		
工作液系统 C_3	1/3	1/2	1	2	3	4	0.16	0.02	0.02
脉冲电源 C_4	1/4	1/3	1/2	1	2	2	0.10		
控制器 C_5	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2	0.07		
坐标工作台 C_6	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	0.04		

表 5 安全性 B_2 准则层下各评价指标权重值
Tab.5 The weight value of each evaluation index under the criterion layer of safety B_2

安全性 B_2	丝筒保护罩 C_7	防水罩高度 C_8	夹具位置 C_9	照明灯 C_{10}	报警指示灯 C_{11}	权重	一致性指标 CI	检测系数 CR
丝筒保护罩 C_7	1	2	1/4	3	3	0.33		
防水罩高度 C_8	1/2	1	7	3	4	0.36		
夹具位置 C_9	1/4	1/7	1	1/2	1/3	0.06	0.02	0.02
照明灯 C_{10}	1/3	1/3	1/2	1	1	0.12		
报警指示灯 C_{11}	1/3	1/4	3	1	1	0.13		

表 6 功能与操作 B_3 准则层下各评价指标权重值
Tab.6 The weight value of each evaluation index under the criterion layer of Function and operation B_3

功能与操作 B_3	控制器操控方便 C_{12}	水箱换液 C_{13}	操作界面可视化 C_{14}	换取工件方便 C_{15}	权重	一致性指标 CI	检测系数 CR
控制器操控方便 C_{12}	1	1/2	1/4	3	0.31		
水箱换液 C_{13}	2	1	5	3	0.47		
操作界面可视化 C_{14}	1/4	1/5	1	1/2	0.08	0.02	0.02
换取工件方便 C_{15}	1/3	1/3	2	1	0.14		

表 7 美学 B_4 准则层下各评价指标权重值
Tab.7 The weight value of each evaluation index under the criterion layer of Aesthetics B_4

美学 B_4	色彩 C_{16}	材质 C_{17}	工艺 C_{18}	造型整体感 C_{19}	造型美观度 C_{20}	权重	一致性指标 CI	检测系数 CR
色彩 C_{16}	1	3	4	5	3	0.43		
材质 C_{17}	1/3	1	4	2	4	0.26		
工艺 C_{18}	1/4	1/4	1	1/2	1/3	0.06	0.08	0.07
造型整体感 C_{19}	1/5	1/2	2	1	1/2	0.10		
造型美观度 C_{20}	1/3	1/4	3	2	1	0.15		

表 8 操作人员期望 B_5 准则层下各评价指标权重值
Tab.8 the weight value of each evaluation index under the criterion layer of operator expects B_5

操作人员期望 B_5	操作界面简单 C_{21}	安全性高 C_{22}	操控台便于操作 C_{23}	机床材质防尘 C_{24}	易于清洁性 C_{25}	权重	一致性指标 CI	检测系数 CR
操作界面简单 C_{21}	1	1/2	2	4	2	0.25		
安全性高 C_{22}	2	1	4	2	4	0.39		
操控台便于操作 C_{23}	1/2	1/4	1	1/2	1/2	0.08	0.10	0.09
机床材质防尘 C_{24}	1/4	1/2	2	1	1/3	0.12		
易于清洁性 C_{25}	1/2	1/4	2	3	1	0.16		

表9 目标层A下准则层指标权重值
Tab.9 The index weight value of criterion layer under target layer A

评价指标体系 A	物理尺度 B ₁	安全性 B ₂	功能与操作 B ₃	美学 B ₄	操作人员期望 B ₅	权重	一致性指标 CI	检测系数 CR
物理尺度 B ₁	1	1/2	5	2	3	0.37		
安全性 B ₂	1/2	1	4	2	4	0.29		
功能与操作 B ₃	1/5	1/4	1	1/2	1/3	0.06	0.07	0.06
美学 B ₄	1/2	1/2	2	1	1/2	0.13		
操作人员期望 B ₅	1/3	1/4	3	2	1	0.15		

2.2.2 熵权法权重计算

通过 15 位技术操作人员对准则层中的各个指标进行评分,评分数据见表 10。通过算数平均值创建准则层原始矩阵。评分数据较多,需要用 EXCEL 软件进行计算,对数据进行归一标准化处理,结果见表 11,各个二级指标的熵权和熵,数据处理结果见表 12。

2.2.3 综合权重计算

通过 AHP 求得权重向量 w^1 与熵权法得到的权重向量 u^1 形成线性综合权重向量 $w = 0.3w^1 + 0.7u^1$ 。

$$w_1=0.24, 0.17, 0.19, 0.13, 0.15, 0.12$$

$$w_2=0.26, 0.29, 0.12, 0.15, 0.18$$

$$w_3=0.34, 0.29, 0.17, 0.20$$

$$w_4=0.28, 0.19, 0.17, 0.14, 0.22$$

$$w_5=0.25, 0.22, 0.15, 0.21, 0.17$$

$$w = 0.24, 0.27, 0.15, 0.17, 0.17$$

2.3 模糊综合评价

依据李克特量表所得到的 10 位技术操作人员满意度评分统计指标,在各评语下依次建立评价集。构建因素集 $B_1=\{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6\}$; $B_2=\{C_7, C_8, C_9, C_{10}, C_{11}\}$; $B_3=\{C_{12}, C_{13}, C_{14}, C_{15}\}$; $B_4=\{C_{16}, C_{17}, C_{18}, C_{19}, C_{20}\}$; $B_5=\{C_{21}, C_{22}, C_{23}, C_{24}, C_{25}\}$ 。指标层评价矩阵 $R_1 \sim R_5$ 。评价指标隶属度见表 13。

表 10 电火花线切割机床设计指标评价数据
Tab.10 Design index evaluation data of WEDM machine tools

评分	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	...	C ₂₀	C ₂₁	C ₂₂	C ₂₃	C ₂₄	C ₂₅
人员 1	88	85	95	88	96	88	85	87	93	...	92	92	89	95	91	94
人员 2	90	83	93	93	92	86	92	86	96	...	93	90	83	90	93	85
人员 3	85	90	88	84	85	94	83	95	91	...	88	88	90	83	88	94
人员 4	96	96	91	91	88	83	94	80	88	...	90	85	78	89	75	85
...
人员 12	87	92	87	83	83	76	85	83	82	...	85	83	89	83	83	93
人员 13	90	85	78	78	94	82	80	82	78	...	93	78	90	75	80	95
人员 14	91	88	80	85	83	79	86	93	88	...	79	74	89	89	85	86
人员 15	86	86	79	93	78	87	80	87	85	...	95	80	91	78	89	92

表 11 标准化处理后的评价数据 r_{ij}
Tab.11 Standardized evaluation data r_{ij}

评分	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	...	C ₂₀	C ₂₁	C ₂₂	C ₂₃	C ₂₄	C ₂₅
人员 1	0.64	0.45	1.00	0.65	1.00	0.67	0.48	0.47	0.83	...	0.82	0.90	0.65	1.00	0.89	0.95
人员 2	0.73	0.35	0.88	0.90	0.81	0.56	0.78	0.40	1.00	...	0.88	0.80	0.29	0.75	1.00	0.50
人员 3	0.50	0.70	0.59	0.45	0.48	1.00	0.39	1.00	0.72	...	0.59	0.70	0.71	0.40	0.72	0.95
人员 4	1.00	1.00	0.76	0.80	0.62	0.39	0.87	0.00	0.56	...	0.71	0.55	0.00	0.70	0.00	0.50
...
人员 12	0.59	0.80	0.53	0.40	0.38	0.00	0.48	0.20	0.22	...	0.41	0.45	0.65	0.40	0.44	0.90
人员 13	0.73	0.45	0.00	0.15	0.90	0.33	0.26	0.13	0.00	...	0.88	0.20	0.71	0.00	0.28	1.00
人员 14	0.77	0.60	0.12	0.50	0.38	0.17	0.52	0.87	0.56	...	0.06	0.00	0.65	0.70	0.56	0.55
人员 15	0.55	0.50	0.06	0.90	0.14	0.61	0.26	0.47	0.39	...	1.00	0.30	0.76	0.15	0.78	0.85

表 12 评价指标的熵及熵权

Tab.12 Entropy and entropy weight of evaluation index

一级指标	二级指标	熵	熵权
物理尺度 B_1	走丝结构 C_1	0.93	0.19
	床身 C_2	0.95	0.14
	工作液系统 C_3	0.93	0.20
	脉冲电源 C_4	0.95	0.14
	控制器 C_5	0.93	0.19
	坐标工作台 C_6	0.94	0.15
安全性 B_2	丝筒保护罩 C_7	0.93	0.22
	防水罩高度 C_8	0.91	0.26
	夹具位置 C_9	0.93	0.14
	照明灯 C_{10}	0.94	0.17
	报警指示灯 C_{11}	0.93	0.21
功能与操作 B_3	控制器操控方便 C_{12}	0.91	0.35
	水箱换液 C_{13}	0.94	0.21
	操作界面可视化 C_{14}	0.95	0.20
美学 B_4	换取工件方便 C_{15}	0.94	0.23
	色彩 C_{16}	0.93	0.21
	材质 C_{17}	0.95	0.16
	工艺 C_{18}	0.93	0.21
	造型整体感 C_{19}	0.95	0.17
操作人员期望 B_5	造型美观度 C_{20}	0.92	0.25
	操作界面简单 C_{21}	0.93	0.25
	安全性高 C_{22}	0.96	0.15
	操控台便于操作 C_{23}	0.95	0.18
	机床材质防尘 C_{24}	0.92	0.25
	易于清洁性 C_{25}	0.95	0.17

$$s_1=w_1R_1=0.20, 0.24, 0.20, 0.15, 0.10$$

$$s_2=w_2R_2=0.29, 0.26, 0.26, 0.18, 0.10$$

$$s_3=w_3R_3=0.34, 0.30, 0.20, 0.10, 0.10$$

$$s_4=w_4R_4=0.28, 0.28, 0.20, 0.10, 0.10$$

$$s_5=w_5R_5=0.25, 0.25, 0.20, 0.00, 0$$

将指标层评价结果作为准则层评价矩阵，即 $R=[s_1, s_2, s_3, s_4, s_5]$ ， w 加权计算后，得到评价结果： $s=wR=(0.27, 0.26, 0.26, 0.18, 0.10)$

2.4 评价结果分析与改进方案

电火花线切割机床评价值为 0.27, 0.26, 0.26, 0.18, 0.10，按照最大隶属度原则，评价结果为非常满意。在准则层评价结果中，5 项评价结果为满意，评价过程严谨，没有太大的设计错误，评价结果与实际情况相符。

在指标层的评价结果中，安全性指标满意度中，非常满意和比较满意的比率占总测度的 50%，然后通过综合权重分析，安全性 B_2 （权重值为 0.27）权重最高，所以需要对其指标进行进一步的检查。发现防水罩高度 C_8 （权重值为 0.26）过低为 340 mm，与工作液平台的落差较大，容易飞溅烫伤操作人员，修正

表 13 评价指标隶属度

Tab.13 Membership degree of evaluation index

一级指标	二级指标	非常满意	比较满意	一般	比较不满意	非常不满意
物理尺度 B_1	走丝结构 C_1	0.2	0.5	0.2	0.1	0
	床身 C_2	0.1	0.5	0.3	0	0.1
	工作液系统 C_3	0.4	0.3	0.1	0.1	0.1
	脉冲电源 C_4	0.3	0.3	0.4	0	0
	控制器 C_5	0.1	0.2	0.4	0.2	0.1
	坐标工作台 C_6	0.1	0.5	0.2	0.1	0.1
安全性 B_2	丝筒保护罩 C_7	0.2	0.3	0.5	0	0
	防水罩高度 C_8	0.5	0.2	0.2	0.1	0
	夹具位置 C_9	0.3	0.2	0.4	0.1	0
	照明灯 C_{10}	0.2	0.3	0.2	0.2	0.1
	报警指示灯 C_{11}	0.2	0.2	0.3	0.2	0.1
功能与操作 B_3	控制器操控方便 C_{12}	0.5	0.3	0.2	0	0
	水箱换液 C_{13}	0.4	0.3	0.2	0.1	0
	操作界面可视化 C_{14}	0.4	0.4	0.2	0	0
美学 B_4	换取工件方便 C_{15}	0.3	0.5	0.1	0	0.1
	色彩 C_{16}	0.3	0.3	0.2	0.1	0.1
	材质 C_{17}	0.5	0.4	0.1	0	0
	工艺 C_{18}	0.3	0.2	0.5	0	0
	造型整体感 C_{19}	0.3	0.5	0.1	0	0.1
操作人员期望 B_5	造型美观度 C_{20}	0.6	0.3	0.1	0	0
	操作界面简单 C_{21}	0.5	0.3	0.2	0	0
	安全性高 C_{22}	0.4	0.5	0.1	0	0
	操控台便于操作 C_{23}	0.6	0.4	0	0	0
	机床材质防尘 C_{24}	0.7	0.3	0.0	0	0
	易于清洁性 C_{25}	0.6	0.3	0.1	0	0

为 430 mm，丝筒保护罩 C_7 （权重值为 0.22）不易操作，将其修改为带把手的设计形式，方便打开。夹具位置 C_9 （权重值为 0.14）符合人机工学。照明灯 C_{10} （权重值为 0.17）位置高度 1 600 mm，相对于一般操作人员（身高为 1 700 mm）高度，不符合人机工学标准，将其设计到操作员的顶部视角，既保证了照明的便捷性，同时产品设计的一体性。报警指示灯 C_{11} （权重值为 0.21），安装的位置太靠里边不易操作人员观察，将其调整到可移动控制设备上。另外走丝结构 C_1 （权重值为 0.19），控制器操控方便 C_{12} （权重值为 0.35），材质 C_{17} （权重值为 0.16），操作界面简单 C_{21} （权重值为 0.25）等因素也对用户满意度有着重要的影响。所以对设计方案进行了更为深入的优化，设计效果见图 4。

3 结语

在电火花线切割机床设计研究中，提出了基于 AHP-熵权法搭建模糊评价模型，既保留专家建议，又充分量化分析，两者相结合，作为产品设计改进的



图4 电火花线切割机改进方案设计
Fig.4 Improved scheme design of WEDM machine

依据。评价过程数据严谨,结果符合实际,评价模型具备科学合理性。提出机床设计研究的指标,为机床的设计研究,全新产品的开发,提供了一个新思路,提高了电火花线切割机设计的改进效率,改善了技术人员对机床设计的满意度。在对准则层包含指标的评分过程中,以及技术人员满意度评分时,采集的样本量小,因此存在一定的局限性。在后续的研究中,可以增加采集的样本数量,并进一步改进。

参考文献:

- [1] 刘志东. 高速往复走丝电火花线切割技术发展趋势[J]. 航空制造技术, 2014, 57(19): 40-45.
LIU Zhi-dong. Development Trend of High Speed Wire-Cut Electrical Discharge Machining[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(19): 40-45.
- [2] 谢冬和. DK7732 型快走丝电火花线切割机加工工艺的改进[J]. 制造技术与机床, 2016(6): 108-110.
XIE Dong-he. Improvement of Machining Process of DK7732 Type Fast Wire EDM Wire Cutting Machine[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2016(6): 108-110.
- [3] 饶佩明, 李浩洲. 往复走丝电火花线切割机恒张力机构的形式及发展趋势[J]. 电加工与模具, 2017(3): 68-70.
RAO Pei-ming, LI Hao-zhou. The Type and Its Trend of Constant Tension Control Mechanism on Wire Electrical Discharge Machines[J]. Electromachining & Mould, 2017(3): 68-70.
- [4] SHARMA P, CHAKRADHAR D, NARENDRANATH S. Analysis and Optimization of WEDM Performance Characteristics of Inconel 706 for Aerospace Application[J]. Silicon, 2018, 10(3): 921-930.
- [5] SENKATHIR S, ARAVIND R, SAMSON R M, et al. Optimization of Machining Parameters of Inconel 718 by WEDM Using Response Surface Methodology: Select Proceedings of ICEMM-M 2018[M]. Singapore: Springer, 2019.
- [6] 李静, 祖江颖, 王依晨, 等. 基于 AHP 和模糊综合评价方法的儿童早教机设计[J]. 包装工程, 2021, 42(2): 118-122.
LI Jing, ZU Jiang-ying, WANG Yi-chen, et al. Design of Early Childhood Instructor Based on AHP and Fuzzy Comprehensive Evaluation Method[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(2): 118-122.
- [7] 宋端树, 辜俊丽, 侯宏平, 等. 基于感性工学与 AHP 的老年人电动自行车造型设计[J]. 包装工程, 2019, 40(8): 130-135.
SONG Duan-shu, GU Jun-li, HOU Hong-ping, et al. Design of Electric Bicycle for Seniors Based on Perceptual Engineering and AHP[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(8): 130-135.
- [8] 王颖, 司占军, 王佳. 基于熵权赋权法的灰关联技术的视频质量评价体系研究[J]. 包装工程, 2016, 37(7): 141-146.
WANG Ying, SI Zhan-jun, WANG Jia. Video Quality Evaluation System of Gray Correlation Technique Based on Entropy Weighting Method[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(7): 141-146.
- [9] SONG Wen-yan, MING Xing-guo, WU Zhen-yong. An Integrated Rough Number-Based Approach to Design Concept Evaluation under Subjective Environments[J]. Journal of Engineering Design, 2013, 24(5): 320-341.
- [10] 姚忠. 采用熵权 TOPSIS 模型的电火花线切割电参数优化[J]. 机械设计与制造, 2018(10): 184-186.
YAO Zhong. Electrical Parameters Optimization of WEDM Using Entropy Weight TOPSIS Model[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(10): 184-186.

- [11] 张军, 王古超, 袁翔, 等. 全向移动机器人设计方案的综合评价研究[J]. 机械设计与制造, 2020(10): 273-275.
ZHANG Jun, WANG Gu-chao, YUAN Xiang, et al. Study on the Comprehensive Evaluation of Omnidirectional Mobile Robot Design[J]. Machinery Design & Manufacture, 2020(10): 273-275.
- [12] 邬锦雯, 孙静蕾, 李敏. 基于熵权法的微信小程序界面设计可用性评价研究[J]. 包装工程, 2021, 42(12): 191-196.
WU Jin-wen, SUN Jing-lei, LI Min. Usability Evaluation of WeChat Program Interface Design Based on Entropy [J]. Packaging Engineering, 2021, 42(12): 191-196.
- [13] 张维群. 指标体系构建与优良性评价的方法研究[J]. 统计与信息论坛, 2006, 21(6): 36-38.
ZHANG Wei-qun. A Study on the Method of Evaluation of Indicators System Construction and Goodness[J]. Statistics & Information Forum, 2006, 21(6): 36-38.
- [14] 虞晓芬, 傅玳. 多指标综合评价方法综述[J]. 统计与决策, 2004(11): 119-121.
YU Xiao-fen, FU Dai. A summary of Multi-index Comprehensive Evaluation methods[J]. Statistics and Decision, 2004(11): 119-121.
- [15] LUO J. Application of AHP and Fuzzy Evaluation in Quota Design[J]. Proceedings of the Advances in Materials Machinery Electrical Engineering, 2017, 114: 477-481.
- [16] YAN F, ZHANG X L, XIAO C Z. Improvement on Entropy Weighting Model in Groundwater Quality Evaluation[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 17(1): 12-16.

(上接第 109 页)

- [16] NAKAMURA C, ZENG T Q. A Taxonomy of Representation Strategies in Iconic Communication[J]. International Journal of Human-Computer Studies, 2012, 70(8): 535-551.
- [17] MCDUGALL S J P, CURRY M B, De B O. Measuring Symbol and Icon Characteristics: Norms for Concrete-ness, Complexity, Meaningfulness, Familiarity, and Semantic Distance for 239 Symbols[J]. Behavior Research Methods, Instruments, & Computers, 1999, 31(3): 487-519.
- [18] ROGERS, Y. Icons at Interface: Their Usefulness[J]. Interacting with computers, 1989(1): 105-117.
- [19] 韩在柱, 舒华, 张玉梅, 等. 动词特异性损伤的原发性进行性失语个案[J]. 中国组织工程研究, 2005, 9(4): 58-59.
HAN Zai-zhu, SHU Hua, ZHANG Yu-mei, et al. A Primary Progressive Aphasic Patient with Verb Specific Deficits[J]. Journal of Clinical Rehabilitative Tissue Engineering Research, 2005, 9(4): 58-59.
- [20] GILLETTE J, GLEITMAN H. Gleitman, L., & Lederer, A[J]. Human simulations of Vocabulary Learning. Cognition, 73(2): 135-176.
- [21] GOONETILLEKE R S, SHIH H M, HUNG K O N, et al. Effects of Training and Representational Characteristics in Icon Design[J]. International Journal of Human-Computer Studies, 2001, 55(5): 741-760.