

# 基于组合赋权灰色关联法的机床设备优选研究

李强,汪永超,李波,吴爱强

四川大学

**摘要:** 考虑到现有的评价方案不够全面,传统的层次分析法(AHP)忽略了评价者本身的模糊性,提出了运用改进的层次分析法从生产周期(T)、生产成本(C)、加工质量(Q)、环境因素(E)和资源消耗(R)五个绿色制造指标进行分析,建立机床设备选择的指标评价体系和初始决策矩阵,并结合熵权法对各项评价指标进行组合赋权,得到各项评价指标的综合权重。采用灰色关联法计算各方案的灰色关联度,并选取灰色关联度最大的机床作为零件加工的最佳机床,并通过阶梯孔加工的实例验证了该方法在优选机床设备中的可行性和优越性。

**关键词:** 绿色制造;机床设备;模糊层次分析法(FAHP);熵权法;灰色关联法

**中图分类号:** TG502;TH166

**文献标志码:** A

**DOI:**10.3969/j.issn.1000-7008.2019.09.007

## Research on Optimal Selection of Machine Tool Equipment Based on Combination Weighted Grey Relational Method

Li Qiang, Wang Yongchao, Li Bo, Wu Aiqiang

**Abstract:** Considering that the existing evaluation schemes are not comprehensive enough, the traditional analytic hierarchy process (AHP) ignores the fuzziness of the evaluators themselves. An improved analytic hierarchy process (AHP) is proposed to analyze the five green manufacturing indexes of production cycle (T), production cost (C), processing quality (Q), environmental factors (E) and resource consumption (R), and to establish the evaluation index of machine tool equipment selection. The system and the initial decision matrix are combined with the entropy weight method to give weight to each evaluation index, and the comprehensive weight of each evaluation index is obtained. Then, the grey relational degree of each scheme is calculated by the grey relational method, and the machine tool with the greatest grey relational degree is selected as the best machine tool for parts processing. Finally, an example of stepped hole machining is given to demonstrate the feasibility and superiority of this method in optimizing machine tool equipment.

**Keywords:** green manufacturing; machine tool equipment; fuzzy analytic hierarchy process (FAHP); entropy weight method; grey correlation method

## 1 引言

机床设备是制造业发展的关键装备,也是高新技术产业必不可少的基础装备,对工业现代化建设起着不可替代的作用,广泛应用于各种领域,尤其是在批量化生产、结构较复杂的机械产品的生产制造中。根据需求的侧重点不同,机床设备优选会产生不同的选择。而且,各项评价指标之间相互关联和相互制约,要获得高质量产品需要更长的生产周期、更高的生产成本、更多的资源消耗和更多的环境维护。因此,如何正确选择机床设备是企业或工厂所面临的关键问题。

已有研究发现了较多可行的机床设备优选方法。陈娜娜<sup>[1]</sup>提出采用灰色系统理论选择数控机床;李磊等<sup>[2]</sup>提出用层次分析法和理想点法来选择机床设备;邵新宇等<sup>[3]</sup>提出使用模糊评判模型来优

化机床设备的选型等。虽然上述方法可用于机床设备的选择,但也有其自身的缺点,如层次分析法分析过程具有很强的主观随意性、需要通过反复计算来调整决策矩阵的一致性;熵权法存在计算得出的权重依赖于由评价对象得来的评价数据的缺点。为了解决传统层次分析法的不足,周立新等<sup>[4]</sup>采用改进的层次分析法优化机床设备选型,即采用模糊层次分析法进行机床选型。该方法是一种将模糊理论与传统层次分析法相结合的分析方法,充分考虑了评价者思维的模糊性,并借助专家经验知识给出并计算指标权重,需要的实际数据少,计算简单,但评价者的偏好和选择对结果有较大影响<sup>[5]</sup>;为了解决模糊层次分析法和熵权法各自存在的缺点,需对机床设备优选方案做出更合理的选择评价。

在前人研究的基础上,本文将模糊层次分析法计算的主观权重与熵权法计算的客观权重进行组合赋权,得到各项评价指标的综合权重,以此弥补两种方法的不足,提高了评价精度。

## 2 指标评价体系的建立

在应用模糊层次分析法(FAHP)对机床设备优选进行分析和评价时,可知该指标评价体系由目标层U、指标层M、子指标层N和方案层X四个层次构成。结合零件加工的实际情况,从生产周期(T)、加工质量(Q)、生产成本(C)、资源消耗(R)和环境因素(E)五个绿色制造指标进行机床设备优选的综合评价(见图1)。

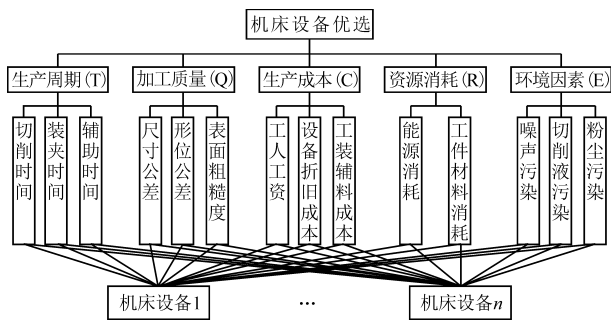


图1 机床设备优选的指标评价体系

## 3 主客观权重及关联度计算

常见的主观权重计算方法有层次分析法和德尔菲法(Delphi法)等,运用较多的客观权重计算方法有熵权法、离差及均方差法等。采用改进的层次分析法计算主观权重,采用熵权法计算客观权重。

### 3.1 基于改进的层次分析法的主观权重计算

层次分析法是将决策者对复杂系统的决策思维过程模型化和数量化。通过应用这种方法,决策者将复杂问题分解为目标、准则、方案等层次和若干因素,在各因素之间进行简单的比较和计算,得出不同方案的权重。模糊层次分析法是一种改进的层次分析法,在层次分析法的基础上运用模糊数学的相关理论来考虑决策者自身的模糊性,并通过计算得到各项评价指标的主观权重。具体步骤见文献[4]。

### 3.2 基于熵权法的客观权重计算

熵的概念最初在热力学中产生,用于描述运动过程中的不可逆现象,后来被引入信息论中用来描述系统状态的不确定性。熵权法是一种基于信息熵理论提出的客观权重法,可根据各项评价指标熵值的大小来确定其客观权重。具体步骤见文献[5-8]。

### 3.3 基于组合赋权的综合权重计算

由于层次分析法<sup>[9-11]</sup>、delphi法等权重计算方法都是基于决策者对各项评价指标重要性的主观认知程度,带有一定的主观随意性。为了既照顾到决

策者的主观偏好,又考虑到各项评价指标数据的客观性,本文对各项评价指标主客观权重进行组合赋权,得到各项评价指标的综合权重(见图2)<sup>[5]</sup>。

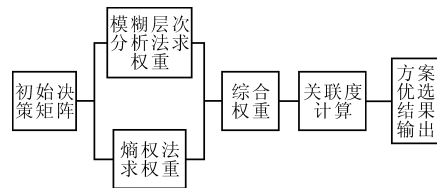


图2 基于组合赋权的灰色关联法在机床设备优选中的应用流程

设模糊层次分析法计算得到的各项评价指标主观权重为 $\alpha_j$ ,熵权法计算得到的各项评价指标客观权重为 $\beta_j$ ,各项评价指标的综合权重为 $\omega_j$ ,则可得组合权重公式为<sup>[6]</sup>

$$\omega_j = \frac{\alpha_j \beta_j}{\sum_{j=1}^n \alpha_j \beta_j} \quad (1)$$

根据上述公式,可以得到各项评价指标的综合权重向量 $W = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ 。

### 3.4 基于灰色关联法的关联度计算

在使用灰色关联法计算关联矩阵时,需要确定初始决策矩阵和参考指标体系、指标值无量纲化以及计算关联系数,最后通过计算关联系数得到关联矩阵<sup>[1]</sup>。将上文求得的综合权重向量 $W$ 引入到关联矩阵中,可求得机床设备优选的各方案关联度。再通过简单的比较和评价,最终确定机床设备选择的最佳方案。设关联矩阵为 $\xi$ ,指标关联度向量为 $R$ ,则各方案的关联度用公式表示为<sup>[12,13]</sup>

$$R = W\xi^T \quad (2)$$

## 4 实例分析

以某工厂一批阶梯孔加工时机床设备选择为例,来说明组合赋权和灰色关联法相结合在机床设备优选中的可行性和有效性。根据阶梯孔的基本参数以及约束条件,从该厂机床设备数据库中初选3种机床设备作为待选机床,其各项评价指标的指标值见表1。运用上述方法对3种机床设备各项指标进行评价,并确定加工阶梯孔的最佳方案。

### 4.1 主观权重的计算

根据建立的机床设备优选指标评价体系,请该厂两位经验丰富的专家对指标层的生产周期(T)、生产成本(C)、加工质量(Q)、资源消耗(R)和环境因素(E)五个绿色制造指标进行两两相互比较,并按照0.1~0.9九标度法对比较结果进行数量标度,建立模糊互补判断矩阵(见表2)。

表1 机床设备选择方案的评价指标

评价指标	方案1	方案2	方案3
切削时间(min)	8	10	9
装夹时间(min)	4	4	5
辅助时间(min)	3	4	3
工人工资(元)	100	80	90
设备折旧成本(元)	6	4	5
工装辅料成本(元)	12	10	11
尺寸公差(mm)	0.020	0.021	0.020
形位公差(mm)	0.018	0.020	0.019
表面粗糙度(μm)	3.2	3.2	3.1
能源消耗(kW)	3	2.8	3.1
工件材料消耗(mm)	0.1	0.08	0.07
噪声污染(dB)	76	80	72
切削液污染	一般	一般	较好
粉尘污染	一般	较差	一般

表2 模糊互补判断矩阵

目标层		时间	成本	质量	资源	环境
专家一	时间	0.5	0.55	0.4	0.6	0.55
	成本	0.45	0.5	0.35	0.5	0.6
	质量	0.6	0.65	0.5	0.7	0.65
	资源	0.4	0.5	0.3	0.5	0.65
	环境	0.45	0.4	0.35	0.35	0.5
专家二	时间	0.5	0.6	0.35	0.55	0.55
	成本	0.4	0.5	0.3	0.45	0.65
	质量	0.65	0.7	0.5	0.65	0.7
	资源	0.45	0.55	0.35	0.5	0.6
	环境	0.45	0.35	0.3	0.4	0.5

分别计算出两位专家给出的模糊一致性判断矩阵的权重向量以及指标层权重向量为

$$\eta_1 = (0.2031 \quad 0.1969 \quad 0.2188 \quad 0.1953 \quad 0.1859)$$

$$\eta_2 = (0.2016 \quad 0.1938 \quad 0.2219 \quad 0.1984 \quad 0.1844)$$

$$\eta = (0.2023 \quad 0.1953 \quad 0.2203 \quad 0.1969 \quad 0.1852)$$

由此可知,在机床设备优选评价体系中,时间、成本、质量、资源消耗、环境影响对机床设备选择的影响权重分别为0.2023、0.1953、0.2203、0.1969、0.1852。使用相同方法构建子指标的模糊互补判断矩阵,可计算出子指标的权重(见表3)。

计算各子指标的层次总权重,即各子指标的主观权重为 $\alpha_1 = 0.087, \alpha_2 = 0.054, \alpha_3 = 0.061, \alpha_4 = 0.078, \alpha_5 = 0.055, \alpha_6 = 0.062, \alpha_7 = 0.080, \alpha_8 = 0.071, \alpha_9 = 0.070, \alpha_{10} = 0.086, \alpha_{11} = 0.111, \alpha_{12} = 0.060, \alpha_{13} = 0.069, \alpha_{14} = 0.056$ 。

#### 4.2 客观权重的计算

在该机床设备优选问题中,3个备选方案对于14个评价指标可构成一个初始决策矩阵为 $F = (f_{ij})_{3 \times 14}$ ,有

表3 各层次指标权重

指标层	指标权重	子指标层	子指标权重
时间	0.2023	切削时间	0.4315
		装夹时间	0.2671
		辅助时间	0.3014
成本	0.1953	工人工资	0.4012
		设备折旧成本	0.2831
		工装辅料成本	0.3157
质量	0.2203	尺寸公差	0.3628
		形位公差	0.3217
		表面粗糙度	0.3155
资源	0.1969	能源消耗	0.4376
		工件材料消耗	0.5624
环境	0.1852	噪声污染	0.3256
		切削液污染	0.3725
		粉尘污染	0.3019

$$F_{3 \times 14} = \begin{bmatrix} 8 & 4 & 3 & 100 & 6 & 12 & 0.020 \\ 10 & 4 & 4 & 80 & 4 & 10 & 0.021 \\ 9 & 5 & 3 & 90 & 5 & 11 & 0.020 \end{bmatrix}$$

$$\left. \begin{matrix} 0.018 & 3.2 & 3 & 0.1 & 76 & \text{一般} & \text{一般} \\ 0.020 & 3.2 & 2.8 & 0.08 & 80 & \text{一般} & \text{较差} \\ 0.019 & 3.1 & 3.1 & 0.07 & 72 & \text{较好} & \text{一般} \end{matrix} \right\}$$

对其做归一化处理时,需要对某些不便于量化的数据进行模糊化处理,以便于比较。取{很好,较好,一般,较差,很差} = {1,0.8,0.6,0.4,0.2},可得到归一化矩阵A为

$$A_{3 \times 14} = \begin{bmatrix} 0.371 & 0.356 & 0.361 & 0.300 & 0.266 & 0.306 & 0.338 \\ 0.300 & 0.356 & 0.278 & 0.371 & 0.406 & 0.361 & 0.325 \\ 0.329 & 0.288 & 0.361 & 0.329 & 0.328 & 0.333 & 0.338 \\ 0.347 & 0.329 & 0.324 & 0.269 & 0.333 & 0.361 & 0.283 \\ 0.320 & 0.329 & 0.351 & 0.343 & 0.320 & 0.361 & 0.433 \\ 0.333 & 0.342 & 0.324 & 0.388 & 0.347 & 0.278 & 0.283 \end{bmatrix}$$

计算各项评价指标的熵值为

$$e_1 = 0.997, e_2 = 0.996, e_3 = 0.994, e_4 = 0.997, e_5 = 0.987, e_6 = 0.998, e_7 = 0.999, e_8 = 0.999, e_9 = 0.999, e_{10} = 0.999, e_{11} = 0.990, e_{12} = 0.999, e_{13} = 0.994, e_{14} = 0.980。$$

计算各项评价指标的差异系数为

$$g_1 = 0.003, g_2 = 0.004, g_3 = 0.006, g_4 = 0.003, g_5 = 0.013, g_6 = 0.002, g_7 = 0.001, g_8 = 0.001, g_9 = 0.001, g_{10} = 0.001, g_{11} = 0.010, g_{12} = 0.001, g_{13} = 0.006, g_{14} = 0.020。$$

计算各项评价指标的客观权重为

$$\beta_1 = 0.042, \beta_2 = 0.056, \beta_3 = 0.083, \beta_4 = 0.042, \beta_5 = 0.181, \beta_6 = 0.028, \beta_7 = 0.014, \beta_8 = 0.014, \beta_9 = 0.014, \beta_{10} = 0.014, \beta_{11} = 0.139, \beta_{12} = 0.014, \beta_{13} = 0.083, \beta_{14} = 0.278。$$

#### 4.3 综合权重的计算

根据式(1)可计算出各子指标的综合权重为

$$\omega_1 = 0.054, \omega_2 = 0.044, \omega_3 = 0.074, \omega_4 = 0.048, \omega_5 = 0.146, \omega_6 = 0.025, \omega_7 = 0.016, \omega_8 = 0.015, \omega_9 = 0.015, \omega_{10} = 0.017, \omega_{11} = 0.224, \omega_{12} = 0.012, \omega_{13} = 0.083, \omega_{14} = 0.227。$$

由此可得各子指标的综合权重向量为

$$W = (0.054 \ 0.044 \ 0.074 \ 0.048 \ 0.146 \ 0.025 \ 0.016 \ 0.015 \ 0.015 \ 0.017 \ 0.224 \ 0.012 \ 0.083 \ 0.227)$$

#### 4.4 关联度的计算

对初始决策矩阵做无量纲化处理,可得到无量纲决策矩阵  $B$  为

$$B_{3 \times 14} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0.5 & 0 & 1 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 1 \\ 1 & 0 & 0.33 & 0 & 0.5 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0.67 & 0 & 1 & 1 \\ 0.5 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

参考指标集  $a_0$  为

$$a_0 = [1, 1, \dots, 1]$$

取分辨率  $\rho = 0.5$ , 灰色关联系数公式为

$$\xi_{ik} = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_{ik} + \rho \Delta_{\max}} = \frac{\min_i \min_k |a_{ok} - a_{ik}| + \rho \max_i \max_k |a_{ok} - a_{ik}|}{|a_{ok} - a_{ik}| + \rho \max_i \max_k |a_{ok} - a_{ik}|}$$

计算得到关联系数后,可得到关联矩阵为

$$\xi_{3 \times 14} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0.33 & 0.33 & 0.33 & 1 \\ 0.33 & 1 & 0.33 & 1 & 1 & 1 & 0.33 \\ 0.5 & 0.33 & 1 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 1 \\ 1 & 0.33 & 0.43 & 0.33 & 0.5 & 1 & 0.33 \\ 0.33 & 0.33 & 1 & 0.60 & 0.33 & 1 & 1 \\ 0.5 & 1 & 0.33 & 1 & 1 & 0.33 & 0.33 \end{bmatrix}$$

根据评价指标的综合权重和关联矩阵,采用式(2)可计算得到各方案的关联度为  $r_1 = 0.5254$ ,  $r_2 = 0.7858$ ,  $r_3 = 0.6074$ 。由此,可得到各方案的关联度向量为  $R = (0.5254 \ 0.7858 \ 0.6074)$ 。

综上所述,方案2为该指标下阶梯孔加工的最佳机床。

## 5 结语

针对机床设备的优选评价问题,采用基于模糊层次分析法和熵权法相结合进行组合赋权的灰色关联法。这种方法的评价指标体系全面,权重计算与主客观情况相结合,能够反映出评价者的意愿。通过阶梯孔加工的实例论证了对各项评价指标进行组合赋权计算得到的综合权重比单独使用模糊层次分析法和熵权法两种方法计算得到的主客观权重更可靠,检验了该方法在机床设备选择的实际应用,提高了机床设备选择的科学性和准确性。虽然求解模型的算法比较复杂,但逻辑严谨,易于使用 MATLAB 或其他编程软件完成,具有很强的实用性和推广性。

## 参考文献

[1] 陈娜娜. 基于灰色系统理论的数控机床选型决策[J]. 微

计算机信息,2006,22(6):138-140.

- [2] 李磊,汪永超,刘晓晨,等. 基于层次分析法—理想点法的机床设备选择[J]. 组合机床与自动化加工技术,2016(12):129-132.
- [3] 邵新宇,李培根. 机床设备选择的多级模糊综合评判模型[J]. 华中理工大学学报,2000(10):1-3.
- [4] 周立新,袁彪,汪永超. 面向绿色制造的机床设备优化选择[J]. 组合机床与自动化加工技术,2018(2):157-160.
- [5] 冯玉光,郎斌. 基于熵权模糊层次分析法的军事供应链绩效评价[J]. 兵器装备工程学报,2017,38(10):86-91.
- [6] 杜彦斌,曹华军,刘飞,等. 基于熵权与层次分析法的机床再制造方案综合评价[J]. 计算机集成制造系统,2011,17(1):84-88.
- [7] 黄维忠. 基于熵权的层次分析法及在船舶投资决策中的应用[J]. 上海海运学院学报,2000(1):97-101.
- [8] 申桂香,张英芝,薛玉霞,等. 基于熵权法的数控机床可靠性综合评价[J]. 吉林大学学报(工学版),2009,39(5):1208-1211.
- [9] 张吉军. 模糊互补判断矩阵排序的一种新方法[J]. 运筹与管理,2005(2):59-63.
- [10] 陈欣. 模糊层次分析法在方案优选方面的应用[J]. 计算机工程与设计,2004,25(10):1847-1849.
- [11] Karimi A R, Mehrdadi N, Hashemian S J, et al. Selction of water treatment process based on the analytical hierarchy process and fuzzy analytical hierarchy process methods [J]. International Journal of Environmental Science and Technology: (IJEST), 2011, 8(2):267-280.
- [12] 鞠家全,刘传进,崔德友,等. 采用灰色关联—层次分析法的机床横梁优化设计[J]. 机械设计与制造,2018(3):26-29.
- [13] Wang Dongqi, Yin Daiyin, Zhou Yazhou. Fine classification of ultra-low permeability reservoirs around the placanticline of daqing oilfield (PR of China)[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 174:1042-1052.

第一作者:李强,硕士研究生,四川大学机械工程学院,610065 成都市

First Author: Li Qiang, Postgraduate, School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China

通信作者:汪永超,教授,博士后,四川大学机械工程学院,610065 成都市

Corresponding Author: Wang Yongchao, Professor, Postdoctoral, School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China