

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2024.09.012

基于 TFAHP 的零件加工特征工艺链模糊综合决策*

陈显久, 张琦, 王智, 马雅丽*
(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 零件加工特征工艺链的决策问题中因存在诸多模糊性因素, 主要依赖工艺人员的经验, 降低了工艺设计的质量和效率, 无法满足经济性需求。针对上述问题, 在考虑了零件加工的经济性, 分析了影响零件加工特征工艺链决策主要因素的基础上, 提出了一种基于三角模糊层次分析法(TFAHP)的零件加工特征工艺链模糊综合决策方法。首先, 采用 TFAHP 构建了判断矩阵, 并基于可能度进行了指标权重求解; 然后, 构建了零件加工特征工艺链的影响因素与其备选集合之间的隶属度函数, 完成了零件加工特征工艺链的模糊综合决策工作; 最后, 以某轴类零件为例, 决策出了满足加工要求的八种孔加工特征工艺链, 并结合企业实际应用, 对该方法在零件加工特征工艺链决策中的经济性及有效性进行了验证。研究表明: 方案 8 的 P 值为 1.0, 为最优加工特征工艺链, 该方法的量化评价 E 值为 0.137, 对比传统方法更加具有经济性, 满足使用需求。

关键词: 机械加工精度; 三角模糊层次分析法; 加工特征工艺链; 模糊综合决策; 评价函数; 决策因素赋权方法

中图分类号: TH161.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2024)09-1641-08

Fuzzy synthesis decision of part processing feature process chain based on TFAHP

CHEN Xianjiu, ZHANG Qi, WANG Zhi, MA Yali

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The decision-making problem in the process chain of part machining features mainly relies on the experience of process personnel due to the existence of many fuzzy factors, which reduces the quality and efficiency of process design and can not meet economic requirements. In response to the above issues, considering the economy of part processing, the main factors affecting the decision-making of part processing feature process chain were analyzed, and a fuzzy comprehensive decision-making method for part processing feature process chain based on triangular fuzzy analytic hierarchy process (TFAHP) was proposed. Firstly, TFAHP was used to construct a judgment matrix, and indicator weights were calculated based on likelihood. Then, the membership function between the influencing factors of the part machining feature process chain and its candidate set was constructed, the fuzzy comprehensive decision-making of the part machining feature process chain was completed. Finally, taking a certain axis type part as an example, eight-hole machining feature process chains that met the machining requirements were determined. Combining with the actual application of the enterprise, the economic and effectiveness of this method in the decision-making of part machining feature process chains were verified. The research results indicate that the P -value of scheme 8 is 1.0, which is the optimal machining feature process chain. The quantitative evaluation E -value of this method is 0.137, which is more economical compared to traditional methods and meets the usage needs.

Key words: machining accuracy; triangular fuzzy analytic hierarchy process (TFAHP); processing characteristics process chain; fuzzy comprehensive decision; evaluation functions; decision-making factor weighting method

收稿日期: 2024-02-22

基金项目: 国防科工局车用动力专项(VTPD-3202)

作者简介: 陈显久(1999-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 硕士研究生, 主要从事零件加工特征识别及其工艺链的综合决策方面的研究。E-mail: 18524760251@163.com

通信联系人: 马雅丽, 女, 博士, 教授。E-mail: myl@dlut.edu.cn

0 引 言

作为智能化工艺设计中的关键部分,加工特征工艺链的决策一直是国内外研究的重要方向之一。

传统的工艺设计通常由工艺技术人员根据个人经验完成。然而,由于设计者的实践经验和生产条件各异,导致设计方案的效率及成本差异较大,难以获得理想的设计结果。因此,学者们对智能化的加工特征工艺链的决策进行了广泛的研究,如基于神经网络、工艺优化算法、模糊决策的方法等。

任涵韬等人^[1]提出了一种基于蝗虫优化算法-反向传播(back propagation, BP)神经网络的特征加工方案智能决策方法,完成了船用柴油机中的连杆特征加工方案的决策工作;但监督学习中网络的训练需要大量样本及标签,增加了学习的成本。GAO Bo 等人^[2]将智能水滴算法与工艺规划问题相结合,在分析优化目标和加工约束的基础上,构建了工艺规划的数学模型,提高了工艺规划的效率。胡权威等人^[3]、DING Shu-hui 等人^[4]构建了决策因子与零件特征加工方案之间的隶属关系,完成了零件特征加工方案的模糊决策工作;但并未进行决策因素的重要程度分析,方法缺少完备性。

在多属性决策问题中,指标的权重分配是一关键环节。由于零件加工特征工艺链的决策存在着诸多模糊性因素,决策方案也存在着多种选择。因此,其指标权重的分配可按照多属性决策问题进行分析。

SAATY 在 20 世纪 70 年代提出了层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)。该方法能将有关决策的问题分解成目标、准则、指标等层次,从而将定性问题转为定量问题,然后再进行研究,这是一种常用的多准则决策方法^[5]。相较于 AHP,三角模糊层次分析法(triangular fuzzy analytic hierarchy process, TFAHP)^[6]将人们对事物认知的强弱以三角模糊数来表示,避免了 AHP 中利用经典数学方法提取专家模糊信息时存在信息丢失的问题,有效提高了专家评价的合理性及准确性。PAN Guang-ze 等人^[7]采用 TFAHP 评估了风险要素的权重,并对不同失效模式的风险优先级进行了排序。MA Zhuang-lin 等人^[8]采用 TFAHP 及准则间相关方法,计算了所有指标的主客观权重,将其用于计算台站重要性,并进行了排序。HUANG Hong-fu 等人^[9]在公差设计中,对主要误差因子进行了全局敏感性分析,采用 TFAHP 对加工难度进行了分析,得到了加工难度的权重系数。SONG Xiao-ming 等

人^[10]在工艺模块化方案评价中,结合零件加工过程各工序的属性和特点,构建了方案评价指标体系,采用改进 TFAHP 对各指标等级的权重进行了调整。贾明刚等人^[11]采用 TFAHP 对切削用量决策中的各指标进行了主客观权重求解,对刀具切削用量的选择模型进行了评价。

在多属性决策问题中,方案决策是另一关键环节。VERMA R 等人^[12]提出了一种基于广义勾股模糊有序加权余弦相似算子的多属性群决策方法,对机器人进行了优选,该方法进一步提高了模糊运算能力。RAO Cong-jun 等人^[13]提出了一种基于灰色二元组的方法,处理了带有不确定性语言变量的决策问题,进而完成了投资项目的选择工作,为主客观耦合问题提供了解决方案。

作为解决多属性决策问题的特例,模糊综合评价法得到了广泛应用。刘存香等人^[14]采用多序关系分析-模糊综合评价法,完成了轿车电液制动系统方案的优选工作。CHEN J F 等人^[15]提出了一种基于模糊层次分析法和模糊综合评价法的教学绩效评价方法,对教师的教学表现做出了更加科学、准确的评价。HU Yan-juan 等人^[16]提出了基于模糊综合评价的定性与定量相结合的方法,解决了评价指标无法公度的问题,为云制造服务提供了更有效的参考。ZHANG Wen-jun 等人^[17]构建了一个基于网络层次分析法与模糊综合评价法相结合的模型,对长三角供水管网风险等级进行了评价。欧阳武等人^[18]提出了基于熵权模糊综合评价法的水润滑尾轴承性能评估模型,在综合考虑专家偏好主观性及数据客观性的基础上,对所有水润滑尾轴承的相对优劣进行了评估。

总之,近年来学者们对各种评价方法进行了广泛地研究,但对于零件加工特征工艺链决策中影响因素的权重分析的研究较少。

为解决传统零件加工特征工艺链的决策问题中存在主观性强、决策指标繁多等问题,笔者利用 TFAHP,对决策指标进行权重分析,结合模糊综合决策算法,完成零件加工特征工艺链的决策工作;并以某轴类零件为例,对基于 TFAHP 的零件加工特征工艺链模糊综合决策方法的经济性及有效性进行验证。

1 基于 TFAHP 的决策因素赋权方法

在零件加工特征工艺链决策中,决策因素的权重分配是一关键问题,其分配结果表示各决策因素的重要程度。零件加工特征工艺链决策中存在着诸多模糊性因素,使得决策因素难以确定。

为此,笔者采用TFAHP对零件加工特征工艺链的决策因素进行权重分配,利用三角模糊转换标度及平均三角模糊数构建三角模糊判断矩阵;得到三角模糊判断矩阵后,基于可能度对三角模糊判断矩阵进行去模糊化处理,从而获得各因素所占权重。

1.1 三角模糊数的定义及其运算

1)三角模糊数的定义。三角模糊数是指论域 R 上的模糊数 \tilde{M} ,其隶属函数的数学表达如下式所示:

$$\mu_M(x) = \begin{cases} \frac{x-l}{m-l}, & l \leq x \leq m \\ \frac{x-u}{m-u}, & m \leq x \leq u \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

式中: l, u 为 \tilde{M} 的下界和上界值; m 为 \tilde{M} 的隶属度等于1时的中值;三角模糊数 \tilde{M} 记为 $M(l, m, u)$ 。

2)三角模糊数的运算。假设两个三角模糊数分别为 M_1 和 M_2 ,则其基本运算规则如下式所示:

$$M_1 \oplus M_2 = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2) \quad (2)$$

$$M_1 \otimes M_2 = (l_1 \times l_2, m_1 \times m_2, u_1 \times u_2) \quad (3)$$

1.2 三角模糊判断矩阵的构造

相较于AHP的判断矩阵,TFAHP采用三角模糊转换标度来描述指标间相对重要性的成对比较判断。

相对重要性的语言术语及其相应的三角模糊标度如表1所示。

表1 三角模糊转换标度

Table 1 Triangular fuzzy transformation scale

语言术语	三角模糊标度
绝对强(AS)	(5/2, 3, 7/2)
非常强(VS)	(2, 5/2, 3)
明显强(FS)	(3/2, 2, 5/2)
略强(SS)	(1, 3/2, 2)
完全相等(E)	(1, 1, 1)
指标的反向比较	上述求逆

笔者对各决策因素的相对重要性进行成对判断,得到如下式所示的个体判断矩阵:

$$\ddot{D}_k = \begin{bmatrix} \ddot{d}_{11} & \cdots & \ddot{d}_{1i} & \cdots & \ddot{d}_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \ddot{d}_{i1} & \cdots & \ddot{d}_{ii} & \cdots & \ddot{d}_{ij} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \ddot{d}_{j1} & \cdots & \ddot{d}_{ji} & \cdots & \ddot{d}_{jj} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: \ddot{d}_{ij} 为决策因素 i 与 j 的相对重要性,且

$$\ddot{d}_{ji} = \frac{1}{\ddot{d}_{ij}}$$

1.3 群判断矩阵的构造

个体判断矩阵的聚合是构成群判断矩阵的重要步骤,个体判断矩阵经聚合后形成的群判断矩阵对指标权重的求解结果影响很大。

为构建更合理的群判断矩阵,笔者采用算数平均模糊数的方法进行计算,将 n 位专家的评价结果整合为一个三角模糊数。

平均三角模糊数 \bar{M} 的计算公式如下所示:

$$\bar{M} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n l_i}{n}, \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{n}, \frac{\sum_{i=1}^n u_i}{n} \right) \quad (5)$$

1.4 基于可能度求解指标权重

第 i 个决策因素的去模糊化权重表达式为:

$$w_i = \frac{d_i}{\sum_{i=1}^n d_i}, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (6)$$

式中: n 为决策因素的个数; d_i 为第 i 个决策因素模糊权重值。

d_i 可由下式求得:

$$d_i = \min P(D_i \geq D_j), i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

式中: $P(D_i \geq D_j)$ 为可能度值。

$P(D_i \geq D_j)$ 由下式求得:

$$P(D_i \geq D_j) = \begin{cases} 1, & m_i \geq m_j \\ 0, & m_i < m_j, u_i \leq l_j \\ \frac{l_j - u_i}{(m_i - u_i) - (m_j - l_j)}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

式中: D_i 为第 i 个评价指标的模糊综合程度值。

D_i 由下式求得:

$$D_i = \sum_{j=1}^n \bar{M}_{ij} \div \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \bar{M}_{ij} = \sum_{j=1}^n \bar{M}_{ij} \otimes \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \bar{M}_{ij} \right)^{-1}, i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

式中: \bar{M}_{ij} 为群判断矩阵第 i 行、第 j 列的元素。

2 加工特征工艺链的模糊综合决策方法

在加工特征工艺链的决策过程中,需考虑零件加工时的各影响因素及企业的加工能力,选择出较优的零件加工特征工艺链。由于加工特征工艺链影响因素与其备选方案之间并不是非此即彼的关系,因此,笔者需构建两者间的隶属度函数,确定其模糊关系。

为保证决策结果的合理性,笔者结合影响因素的权重分配,采用加权平均模糊合成算子,完成零件加工

特征工艺链的模糊综合决策。

2.1 加工特征工艺链影响因素集合的确定

针对零件加工时的经济性问题,笔者分析了影响加工特征工艺链决策结果的主要因素,得到其影响因素为材料类型、尺寸大小、尺寸精度、形状精度、位置精度、表面粗糙度。

为便于表达,可将影响因素表示为集合 $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6\} = \{M, D, IT, FP, PP, R_a\}$ 。其中: M 为零件材料类型, $M = \{M_1, M_2, M_3, M_4\} = \{\text{黑色金属, 钢, 铸铁, 有色金属}\}$; D 为孔的大小, $D = \{D_1, D_2, D_3\} = \{\text{小孔, 中孔, 大孔}\}$; IT, FP, PP, R_a 分别为

零件加工特征的尺寸精度、形状精度、位置精度、表面粗糙度。

2.2 加工特征工艺链备选集合的构建

零件加工时需考虑的影响因素很多,由于加工特征及其精度要求的不同,所采用的加工特征工艺链也有所差异。

根据国标以及各类工艺手册,笔者综合考虑零件加工特征工艺链影响因素集合 U ,以孔特征为例,按照不同加工特征工艺链所能达到的尺寸、形状、位置精度以及表面粗糙度的不同,构建了其加工特征工艺链备选集合,如表 2 所示。

表 2 孔加工特征工艺链
Table 2 Process chain of hole processing characteristics

序号	加工特征工艺链	尺寸精度	形状精度	位置精度	表面粗糙度	零件材料	尺寸大小
1	钻	11~12	9~10	10~12	6.3~12.5	黑色金属、有色金属	小型圆柱孔、锥孔
2	钻-粗铰	8~10	8~9	9~10	3.2~6.3	黑色金属、有色金属	中小型圆柱孔和锥孔
3	钻-粗铰-精铰	7~8	7~9	7~8	1.6~3.2	黑色金属、有色金属	中小型圆柱孔和锥孔
4	钻-扩	9~10	8~9	9~10	3.2~12.5	黑色金属、有色金属	中小型圆柱孔和锥孔
5	钻-扩-铰	8~9	7~8	8~9	3.2~6.3	黑色金属、有色金属	中小型圆柱孔和锥孔
6	钻-扩-粗铰-精铰	7~8	7~8	7~9	1.6~3.2	黑色金属、有色金属	中小型圆柱孔和锥孔
7	钻-扩-精铰	7~8	6~7	7~9	1.6~3.2	黑色金属、有色金属	中小型圆柱孔和锥孔
8	钻-扩-精铰-珩磨	6~7	5~7	6~8	0.8~1.6	黑色金属	中小型圆柱孔和锥孔
9	钻-扩-精铰-金刚铰	6~8	6~8	7~8	0.8~3.2	钢、铸铁	中小型圆柱孔和锥孔
10	铰削-半精铰	8~10	8~9	8~10	3.2~6.3	黑色金属、有色金属	大型圆柱孔、环切槽
11	铰削-半精铰-精铰	7~9	7~9	8~9	1.6~3.2	黑色金属、有色金属	大型圆柱孔、环切槽
12	铰削-半精铰-精铰-珩磨	6~7	6~7	6~7	0.8~1.6	黑色金属、有色金属	大型圆柱孔、环切槽
13	铰削-半精铰-磨削	7~9	8~10	8~9	1.6~3.2	有色金属	大型圆柱孔、环切槽
14	铰削-半精铰-粗磨-精磨-研磨	6~7	6~7	6~8	0.8~3.2	黑色金属、有色金属	任意型号圆柱孔

基于 14 种孔类零件加工特征工艺链,笔者建立对应的模糊决策备选集合: $V = \{v_1, v_2, \dots, v_{14}\}$,其中, v_1, v_2, \dots, v_{14} 分别对应表 2 中的 14 种孔加工工艺链。

2.3 隶属度函数的确定

为进行后续的加工特征工艺链模糊综合决策,需建立 2.1 节分析的加工特征工艺链影响因素与 2.2 节中分析的加工特征工艺链备选集合之间的隶属函数,其中形状精度、位置精度以及表面粗糙度与加工特征工艺链的隶属度函数结构相同。因此,故笔者只列出形状精度与加工特征工艺链的隶属度函数加以说明。

1) 零件材料与加工特征工艺链的隶属度函数

在加工过程中,零件材料的影响较大,不同材料其加工需求不同。零件材料与加工特征工艺链之间的隶属度函数为:

$$f_{M*V}(M_j) = \frac{r_{11}}{(M_i, V_1)} + \frac{r_{12}}{(M_i, V_2)} + \dots + \frac{r_{1j}}{(M_i, V_j)} \quad (10)$$

根据规定,零件材料 $M \in M_i$ 时, $r_{ij} = 1$, 否则 $r_{ij} = 0$

($j = 1, 2, \dots, 14$); 以此进行模糊处理,零件材料与孔加工特征工艺链的单因素模糊决策子集可表示为: $R_M = (r_{11}, r_{12}, \dots, r_{1j})$ 。

2) 加工特征类型与加工特征工艺链的隶属度函数

笔者以孔的特征为例,进行加工特征类型与其工艺链间隶属度函数的构建。

根据径向尺寸,可将孔类特征定义为小孔(孔径 $D < 20 \text{ mm}$)、中孔(孔径 $20 \text{ mm} \leq D \leq 50 \text{ mm}$)和大孔(孔径 $D > 50 \text{ mm}$)三类,则其加工特征类型与其工艺链之间的隶属度函数为:

$$f_{D*V}(D_i) = \frac{r_{21}}{(D_i, V_1)} + \frac{r_{22}}{(D_i, V_2)} + \dots + \frac{r_{2j}}{(D_i, V_j)} \quad (11)$$

根据规定,零件材料 $D \in D_i$ 时, $r_{2j} = 1$, 否则 $r_{2j} = 0$ ($j = 1, 2, \dots, 14$); 以此进行模糊处理,零件加工特征类型与孔加工特征工艺链的单因素模糊决策子集可表示为: $R_D = (r_{21}, r_{22}, \dots, r_{2j})$ 。

3) 尺寸精度与加工特征工艺链的隶属度函数

尺寸精度对零件加工特征工艺链的决策具有重要影响,零件的尺寸精度越高,则对应的公差等级越小。隶属度函数设计规定如下:

①当待加工零件加工特征的尺寸精度 IT 小于备选加工特征工艺链方案 v_j 的 $IT_H(V_j)$ 或大于 $IT_L(V_j) + 1$ 时,则该方案不符合要求,可行性为零;

②当待加工零件加工特征的尺寸精度 IT 处于备选加工特征工艺链方案 v_j 的 $IT_H(V_j)$ 与 $IT_L(V_j)$ 之间时,则该方案完全可行;为便于模糊化处理,可设定可行性范围为 $[0.8, 1]$;

③考虑到零件加工的经济性问题,当待加工零件的尺寸精度 IT 处于备选加工特征工艺链方案 v_j 的 $IT_L(V_j)$ 与 $IT_L(V_j) + 1$ 之间时,加工精度虽然容易保证,但是加工经济性较差,故可将可行性范围设为 $[0.8, 1]$ 。

综上,可以得到尺寸精度与加工特征工艺链间的隶属度函数如下:

$$\mu(IT, V_j) = \begin{cases} 0, & IT < IT_H(V_j) \\ 1 - \frac{IT_L(V_j) - IT}{5(IT_L(V_j) - IT_H(V_j))}, & IT_H(V_j) \leq IT \leq IT_L(V_j) \\ 1 - \frac{IT - IT_L(V_j)}{5(IT_L(V_j) - IT_H(V_j))}, & IT_L(V_j) < IT \leq IT_L(V_j) + 1 \\ 0, & IT_L(V_j) + 1 < IT \end{cases} \quad (12)$$

式中: $IT_H(V_j)$ 为尺寸精度上限; $IT_L(V_j)$ 为尺寸精度下限。

隶属函数图如图 1 所示。

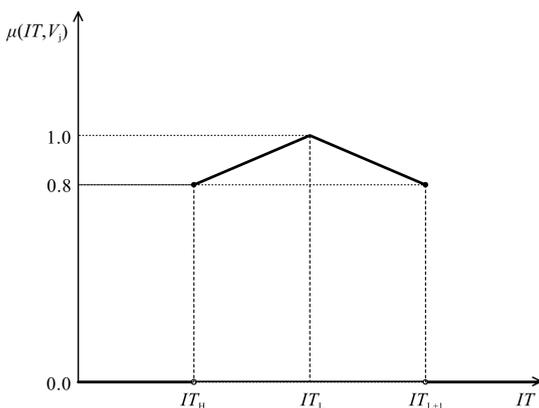


图 1 尺寸精度与加工特征工艺链的隶属函数图
Fig. 1 Membership function diagram of dimensional accuracy and machining feature process chain

图 1 中, IT_H 与 $IT_L + 1$ 中间部分为加工可行范围, 两侧为加工不可行范围。

④形状精度与加工特征工艺链的隶属度函数。

同理,加工特征形状精度可行性的表达与尺寸精度类似。该处运用梯形偏小型模糊分布对形状精度与加工特征工艺链的模糊关系映射进行刻画,其隶属度函数为:

$$\mu(FP, V_j) = \begin{cases} 0, & FP < FP_H(V_j) \\ 1 - \frac{FP_L(V_j) - FP}{5(FP_L(V_j) - FP_H(V_j))}, & FP_H(V_j) \leq FP \leq FP_L(V_j) \\ 1, & FP > FP_L(V_j) \end{cases} \quad (13)$$

式中: $FP_H(V_j)$ 为形状精度上限; $FP_L(V_j)$ 为形状精度下限。

隶属函数图如图 2 所示。

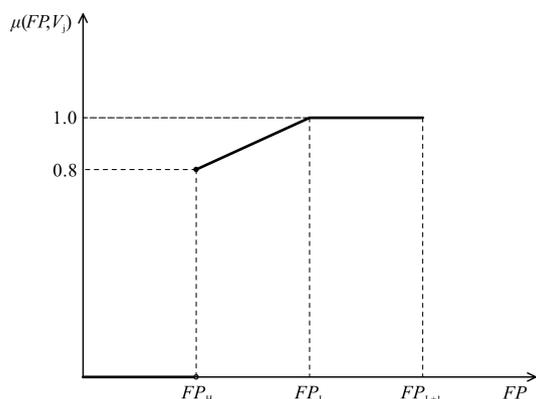


图 2 形状精度与加工特征工艺链的隶属函数图
Fig. 2 Membership function diagram of shape accuracy and machining feature process chain

图 2 中, FP_H 与 $FP_L + 1$ 之间为加工可行范围, FP_L 与 $FP_L + 1$ 之间为完全可行加工范围, FP_H 左侧及 $FP_L + 1$ 右侧为不可行加工区范围。

2.4 加工特征工艺链模糊综合决策

模糊决策过程是利用隶属函数进行模糊化。为此,笔者以 2.3 节确定的隶属度值为元素,构建单因素决策矩阵。为提高综合决策结果的合理性,此处采用加权平均模糊合成算子,完成零件加工特征工艺链的模糊综合决策。

1) 单因素模糊决策

对第 i 个决策因素 u_i 进行决策时,设 u_i 对第 j 个备选方案 v_j 的隶属度为 r_{ij} ,则按单因素 u_i 决策的结果可以用如下关系式来表示:

$$R_i = r_{i1}/(u_i, v_1) + r_{i2}/(u_i, v_2) + \dots + r_{in}/(u_i, v_n) \quad (14)$$

式中: R_i 为单因素决策集合; u_i 为加工特征工艺链的影响因素; v_n 为备选的各加工特征工艺链。

以各单因素决策集的隶属度为行,组成单因素决策矩阵 R 为:

$$R = \begin{bmatrix} R|r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ R|r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R|r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (15)$$

2) 多因素模糊综合决策

根据 1.4 节求解的决策因素权重,假设加工特征工艺链的权重向量 $W = \{\omega_1, \omega_1, \dots, \omega_m\}$, 则决策因素 U 中, 所有决策因素的综合评价结果如下式所示:

$$P = W \circ R = (p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_n) \quad (16)$$

式中:“ \circ ”为模糊合成算子; p_i 为加工特征工艺链集合

中第 i 个加工特征工艺链的模糊综合决策值。

笔者采用加权平均型模糊合成算子进行模糊运算。该算子的定义如下式所示:

$$M(\cdot, \oplus) = \sum_{i=1}^m \omega_i \cdot r_{ij} (j = 1, 2, 3, \dots, 14) \quad (17)$$

式中:“ \oplus ”为有界积运算。

3 实例验证与分析

笔者以孔加工特征工艺链(表 1)为例进行验证。零件工艺信息图如图 3 所示。

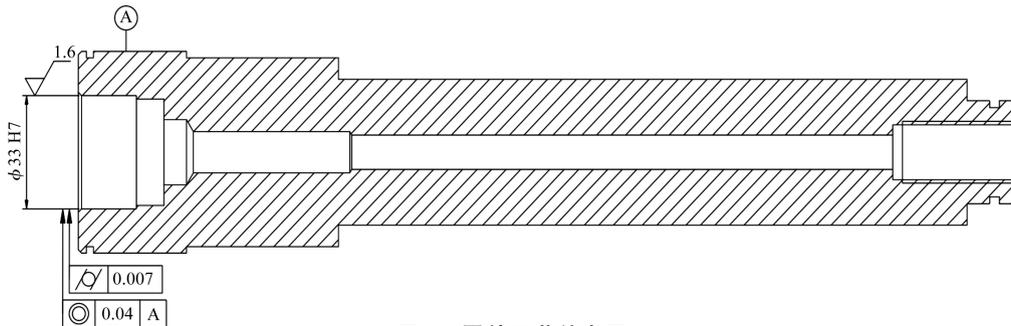


图 3 零件工艺信息图

Fig. 3 parts process information diagram

图 3 中的工艺信息为: $M = M_1, D = \phi 33H7, R_a = 1.6, FP = 0.007$ (等级为 7 级), $PP = 0.04$ (等级为 8 级)。

3.1 基于 TFAHP 的决策因素赋权

针对上述的孔加工特征相关工艺信息,可得到其决策因素为 $U = \{M, D, IT, FP, PP, Ra\}$ 。

根据项目合作单位的三位专家的评价结果,笔者构建了相关的个体判断矩阵,如表 3 所示。

表 3 个体判断矩阵
Table 3 Individual judgment matrix

D_k	M	D	IT	FP	PP	R_a
M	E, FS, SS, FS, FS, SS, SS,	FS, VS, FS, VS, VS, FS, FS,	SS, FS, VS, VS, VS, FS, FS,	FS, VS, VS, VS, VS, FS, FS,	FS, VS, VS, VS, VS, FS, FS,	SS, FS, FS, FS, FS, FS, FS,
D	FS ⁻¹ , VS ⁻¹ , SS ⁻¹ ,	E, E, E, E, E, E, E,	SS ⁻¹ , FS ⁻¹ , E, E, E, E, E,	SS, FS, E, E, E, E, E,	SS, FS, E, E, E, E, E,	SS ⁻¹ , FS ⁻¹ , E, E, E, E, E,
IT	FS ⁻¹ , FS ⁻¹ , SS ⁻¹ ,	FS, FS, E, E, E, E, E,	E, E, E, E, E, E, E,	FS, FS, E, E, E, E, E,	FS, FS, E, E, E, E, E,	FS, FS, FS, FS, FS, FS, FS,
FP	FS ⁻¹ , VS ⁻¹ , SS ⁻¹ ,	SS ⁻¹ , FS ⁻¹ , E, E, E, E, E,	SS ⁻¹ , FS ⁻¹ , E, E, E, E, E,	E, E, E, E, E, E, E,	E, SS, E, E, E, E, E,	E, SS, SS, SS, SS, SS, SS,
PP	FS ⁻¹ , VS ⁻¹ , SS ⁻¹ ,	SS ⁻¹ , FS ⁻¹ , E, E, E, E, E,	SS ⁻¹ , FS ⁻¹ , E, E, E, E, E,	E, E, E, E, E, E, E,	E, E, E, E, E, E, E,	E, SS, SS, SS, SS, SS, SS,
R_a	SS ⁻¹ , FS ⁻¹ , E, E, E, E, E,	SS, FS, E, E, E, E, E,	FS ⁻¹ , VS ⁻¹ , SS ⁻¹ ,	E, SS ⁻¹ ,	E, SS ⁻¹ ,	E, E, E, E, E, E, E,

笔者利用式(5)对三位专家的评价结果进行聚合,联立式(6)~式(9),计算各决策因素的可能性,由此可以得到其归一化的权重为 $W = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_6\} = \{0.246, 0.120, 0.178, 0.139, 0.139, 0.178\}$ 。

3.2 加工特征工艺链的模糊综合决策

根据零件的加工信息,笔者结合 2.2 节建立了孔加工特征工艺链的备选集合 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_{14}\}$,联立式(10)~式(17),可求得孔加工特征工艺链的单因素模糊决策矩阵,如表 4 所示。

表 4 单因素模糊决策矩阵
Table 4 Single factor fuzzy decision matrix

备选方案序号	影响因素与备选方案隶属度值					
	R_M	R_D	$\mu(IT, v_j)$	$\mu(FP, v_j)$	$\mu(PP, v_j)$	$\mu(Ra, v_j)$
1	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	1.000	1.000	0.800	0.800	1.000	0.800
4	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	1.000	1.000	0.000	0.800	0.800	0.000
6	1.000	1.000	0.800	0.800	1.000	0.800
7	1.000	1.000	0.800	1.000	1.000	0.800
8	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
9	0.000	1.000	0.900	1.000	1.000	0.900
10	1.000	0.000	0.000	0.000	0.800	0.000
11	1.000	0.000	0.800	0.800	0.800	0.800
12	1.000	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000
13	0.000	0.000	0.800	0.000	0.800	0.800
14	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.900

结合权重向量 $W = \{\omega_1, \omega_1, \dots, \omega_6\} = \{0.246, 0.120, 0.178, 0.139, 0.139, 0.178\}$, 利用式(16)可求

解得到模糊综合决策结果 P 值, 如表 5 所示。

表 5 模糊综合决策结果

Table 5 Results of fuzzy comprehensive decision making

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}
P 值	0.246	0.366	0.901	0.366	0.588	0.901	0.929	1.000	0.800	0.357	0.801	0.880	0.396	0.982
$P \geq 0.8$	否	否	是	否	否	是	是	最优	是	否	是	是	否	是

由表 5 可知:随着综合决策结果 P 值的降低,零件加工的经济性会降低。

为保证零件加工的经济性,在综合决策结果 P 值取 0.8 的情况下,可以得到 8 种可行方案,其中,最优解为方案 8——“钻-扩-精镗-珩磨”。

基于某企业的实际应用,该加工方案在实际加工时能满足该孔的各项精度要求。

为进一步证明 TFAHP 赋权方法的有效性,根据已建立的加工特征工艺链备选集合及单因素模糊决策矩阵,使用传统 AHP 赋权方法对其进行决策,得到的影响因素权重为 $W = \{\omega_1, \omega_1, \dots, \omega_6\} = \{0.384, 0.121, 0.223, 0.073, 0.082, 0.117\}$ 。

依据该权重并结合单因素决策矩阵,可求解得到模糊综合决策结果 P 值,如表 6 所示。

表 6 传统 AHP-模糊综合决策结果

Table 6 Traditional AHP-fuzzy synthetic decision result

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}
P 值	0.384	0.505	0.917	0.505	0.629	0.917	0.932	1.000	0.582	0.450	0.780	0.879	0.338	0.988
$P \geq 0.8$	否	否	是	否	否	是	是	最优	否	否	否	是	否	是

由表 6 可知:赋权方法的不同使得零件加工特征工艺链的决策结果存在差异,决策出的加工特征工艺链数量也会随之变化。

在实际加工时,存在制造资源或企业加工能力不足的情况,导致可行决策结果太少。

因此,为清晰比较决策方法的有效性,笔者建立评价函数 E ,对决策结果进行聚合, E 值越小代表该决策方法越准确。

构建的评价函数 E 如下式所示:

$$E = \frac{1}{\sum_{j=1}^n P_j}, j = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

式中: n 为可行的方案总数。

在综合决策结果 P 值取 0.8 时,结合表 5 与表 6,利用式(18)分别求解,可得到 $E_1 = 0.139, E_2 = 0.178$ 。由此可得知 $E_1 < E_2$,说明 TFAHP 算法决策出的方案更加合理。

4 结束语

针对零件加工特征工艺链决策中存在决策指标繁多、缺乏合理的指标权重分配问题,笔者提出了一种基于 TFAHP 的零件加工特征工艺链模糊综合决策方法。

首先,采用 TFAHP 构建了判断矩阵,并基于可能度进行了指标权重求解;其次,确定了加工特征工艺链的影响因素集合,构建了零件加工特征工艺链的影响

因素与其备选集合之间的隶属度函数;然后,对决策指标的权重进行了确定,结合隶属函数值,利用 TFAHP 算法对孔特征进行了模糊综合决策;最后,为验证该方法在零件加工特征工艺链决策中的经济性及有效性,利用评价函数与传统 AHP 方法进行了对比。

研究结论如下:

1) 采用 TFAHP 对加工特征工艺链的影响因素进行了赋权,分析得到了其影响因素权重排序如下: $M(0.246) > IT(0.178) = Ra(0.178) > FP(0.139) = PP(0.139) > D(0.120)$,说明对零件加工特征工艺链的决策主要侧重于零件材料,最后考虑特征类型;

2) 采用模糊综合决策方法对零件加工特征工艺链进行了决策,得到了八种孔加工特征的可行工艺链(其中方案 8 的 P 值为 1.0,为最优工艺链);利用评价函数 E ,在综合决策结果 $P = 0.8$ 时,得到 $E_1 = 0.139$,对比使用传统 AHP 方法得到的 $E_2 = 0.178$,可知 E_1 明显小于 E_2 ,由此证明 TFAHP 方法更加具有经济性。

在后续的研究中,笔者将结合企业实际加工能力,在算法上将制造资源作为约束,以进一步精确选择加工特征工艺链,减少人工决策过程,为实现智能化工艺设计奠定基础。

参考文献 (References):

[1] 任涵涵,张胜文,程德俊,等.基于机器学习的典型零件特征加工方案智能决策研究[J].组合机床与自动化加工

- 技术,2022,64(11):106-110.
- REN Han-tao, ZHANG Sheng-wen, CHENG De-jun, et al. Research on intelligent decision of typical part feature machining scheme based on machine learning[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Machining Technology*,2022,64(11):106-110.
- [2] GAO Bo, HU Xiao-yu, PENG Zhen-rui, et al. Application of intelligent water drop algorithm in process planning optimization [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*,2020,106(11):5199-5211.
- [3] 胡权威,刘德亮,杜 鹏. 基于 Tsukamoto 模糊推理的特征加工方案决策方法[J]. *航天制造技术*,2018,36(4):5-9,39.
- HU Quan-wei, LIU De-liang, DU peng. Feature machining scheme decision method based on Tsukamoto fuzzy reasoning [J]. *Aerospace Manufacturing Technology*,2018,36(4):5-9,39.
- [4] DING Shu-hui, GUO Zhong-yuan, WANG Bin, et al. MBD-based machining feature recognition and process route optimization[J]. *Machines*,2022,10(10):906.
- [5] LIST H O, SCHOEGGL P. Objective Evaluation of Vehicle Drivability[C]//*International Congress & Exposition*,1998:1-9.
- [6] 李永锋,朱丽萍. 基于模糊层次分析法的产品可用性评价方法[J]. *机械工程学报*,2012,48(14):183-191.
- LI Yong-feng, ZHU Li-ping. Product availability evaluation method based on fuzzy analytic hierarchy process[J]. *Journal of Mechanical Engineering*,2012,48(14):183-191.
- [7] PAN Guang-ze, LI Dan, LI Qian, et al. Advanced FMECA method based on intuitionistic 2-tuple linguistic variables and the triangular fuzzy analytic hierarchy process [J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*,2022,32(4)1-7.
- [8] MA Zhuang-lin, LIU Jie, CHIEN S I, et al. Identifying critical stations affecting vulnerability of a metro network considering passenger flow and cascading failure; case of Xi'an metro in China[J]. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*,2023,9(2):1013
- [9] HUANG Hong-fu, DU Xue-song, SONG Chao-sheng. Research on tolerance design method of harmonic reducer based on weight coefficient [J]. *Mechanical Design and Research*,2023,39(1):75.
- [10] SONG Xiao-ming, FAN Bo, SONG Ke-xing, et al. Evaluation of process modularization scheme based on the improved TFAHP and TOPSIS [J]. *China Sciencepaper*,2020,15(4):438-443,448.
- [11] 贾明刚,汪永超,黄 建,等. 基于模糊层次分析法和 TOPSIS 法的切削用量选择[J]. *组合机床与自动化加工技术*,2018,60(10):140-144.
- JIA Ming-gang, WANG Yong-chao, HUANG Jian et al. Selection of cutting parameters based on fuzzy analytic hierarchy process and TOPSIS Method [J]. *Combination Machine Tool & Automatic Machining Technology*,2018,60(10):140-144.
- [12] VERMA R, MITTAL A. Multiple attribute group decision-making based on novel probabilistic ordered weighted cosine similarity operators with Pythagorean fuzzy information[J]. *Granular Computing*,2023,8(1):111-129.
- [13] RAO Cong-jun, WANG Cheng, HU Zhou, et al. Gray uncertain linguistic multi-attribute group decision making method based on GCC-HCD [J]. *IEEE. Transactions on Computational Social Systems*,2022,99(6):1-15.
- [14] 刘存香,刘学军,莫韦花. 多序关系分析-模糊综合评价法在轿车电液制动系统方案评判中的应用[J]. *机电工程*,2019,36(10):1089-1093.
- LIU Cun-xiang, LIU Xue-jun, MO Wei-hua. Application of multi-sequence relationship analysis and fuzzy comprehensive evaluation method in scheme evaluation of car electro-hydraulic braking system [J]. *Mechanical and Electrical Engineering*,2019,36(10):1089-1093.
- [15] CHEN J F, HSIEH H N, DU Q H. Evaluating teaching performance based on fuzzy AHP and comprehensive evaluation approach [J]. *Applied Soft Computing*,2015,28(3):100-108.
- [16] HU Yan-juan, WU Li-zhe, PAN Xue-qiao, et al. Comprehensive evaluation of cloud manufacturing service based on fuzzy theory [J]. *International Journal of Fuzzy Systems*,2021,23(6):1755-1764.
- [17] ZHANG Wen-jun, LAI Tao-tao, LI Yao. Risk assessment of water supply network operation based on ANP-fuzzy comprehensive evaluation method [J]. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*,2022,13(1):1-14.
- [18] 欧阳武,程启超,金 勇,等. 基于熵权模糊综合评价法的水润滑尾轴承性能评估[J]. *中国机械工程*,2020,31(12):1407-1414.
- OUYANG Wu, CHENG Qi-chao, JIN Yong, et al. Performance evaluation of water-lubricated tail bearings based on entropy weight fuzzy comprehensive evaluation method [J]. *China Mechanical Engineering*,2020,31(12):1407-1414.

本文引用格式:

陈显久,张 琦,王 智,等. 基于 TFAHP 的零件加工特征工艺链模糊综合决策[J]. *机电工程*,2024,41(9):1641-1648.

CHEN Xianjiu, ZHANG Qi, WANG Zhi, et al. Fuzzy synthesis decision of part processing feature process chain based on TFAHP[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2024,41(9):1641-1648.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>