

基于犹豫模糊集的制造过程多指标定量综合评价法

王宏伟¹, 冉琰^{1†}, 张根保^{1,2}

(1. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 重庆文理学院 机电工程学院, 重庆 402160)

摘要: 制造过程的稳定性是企业保障产品质量的基础, 针对以往过程管理中缺乏系统的、全面的定量分析工具的问题, 建立了面向制造过程的多指标定量评价体系, 对制造过程各影响因素进行具体分析定点评价, 并基于犹豫模糊理论和多准则决策方法给出了过程因素期望指数和制造过程期望指数的计算步骤, 以评价等级表的方式将制造过程所处的生产状态进行量化表达。实例分析表明, 该方法能帮助管理者直观有效地评价制造过程状态, 为企业在数字化生产建设方面提供更多维度的管理数据。

关键词: 犹豫模糊集; 多准则决策; 制造过程; 综合评价

中图分类号: U260.6

文献标志码: A

Comprehensive Evaluation Method for Quantitative Multi-indexes of Manufacturing Process Based on Hesitant Fuzzy Sets

WANG Hongwei¹, RAN Yan^{1†}, ZHANG Genbao^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160, China)

Abstract: Stability of manufacturing process is the basic for the company to guarantee the produce quality. In view of the lack of systematic and comprehensive quantitative analysis tools in the past process management, a multi-index quantitative evaluation system for manufacturing process is established. The influence factors on manufacturing process are analyzed and evaluated, and the calculation steps of process factor expectation index and manufacturing process expectation index are given based on the hesitant fuzzy theory and multi criteria decision making method. The production state of manufacturing process is expressed quantitatively by the rating scale. Case analysis shows that the method can help managers to evaluate the manufacturing process status intuitively and effectively, and provide more dimensional management data for enterprises in digital production construction.

Key words: hesitant fuzzy sets; multi-criteria decision making; manufacturing process; comprehensive evaluation

* 收稿日期: 2020-05-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51835001, 51705048), National Natural Science Foundation of China(51835001, 51705048); 国家科技重大专项(2016ZX04004-005, 2018ZX04032-001, 2019ZX04005-001), National Major Scientific and Technological Special Project of China(2016ZX04004-005, 2018ZX04032-001, 2019ZX04005-001)

作者简介: 王宏伟(1990—), 男, 河南信阳人, 重庆大学博士研究生

† 通信联系人, E-mail: ranyan@cqu.edu.cn

面对竞争空前激烈的商业环境,产品质量是一个企业赖以生存和发展的基石.而制造过程作为全面质量管理中的最重要的环节,是保障零件加工质量的基础.因此对制造过程的定量分析控制一直都是企业管理需要解决的首要任务.

目前,全面质量管理中常用的分析工具有:亲和图法^[1-2]或KJ法(Affinity diagram)、关联图法^[3](Inter-relationship diagram)、树形图法^[4-5](Tree diagram)、时间管理优先矩阵^[6](Prioritization matrix)、过程决策程序图^[7](Process decision program chart)、活动网络图^[8](Activity network diagram)、六十秒即时换模^[9](Single minute exchange of die).这些方法主要是对管理过程中的信息进行分类和处理,不能实现系统定量地评价制造过程的状态.此外,在批量生产中常用过程能力指数(Process capability index)实现以加工结果来定量评价制造过程能力^[10].为了更好的保证制造过程的稳定性和可控性,不仅需要针对加工结果进行评价,还需要建立合理的制造过程评价模型,对制造过程的各影响因素进行定点控制.

影响制造过程的主要因素包括人员(Personnel)、设备(Equipment)、材料(Material)、工作方法(Method)、环境(Environment)和测量(Measurement)等^[11].重庆大学张根保教授等^[12]对各因素的影响机理进行了分析并提出了相应的控制措施,但只适用于指导制造过程改进并未提出定量的评价方法.因此本文在此基础上进一步制定了各影响因素的定点定量评价指标体系,提出了过程因素期望指数的概念来直观地表达各影响因素的状态,并给出了相关计算公式和评价等级表.

考虑到各因素对制造过程影响的重要程度是不同的,因此在进行制造过程综合评定的时候需要计算各影响因素的重要度值.对于不同的制造企业而言,各影响因素会因为企业需求和能力不同而具有不同影响程度,从而需要决策者根据多个评价准则来进行综合评估.为了解决这种多准则评价问题,在管理科学中已经提出了多种有效的数学模型.Zadeh^[13]于1965年时提出的模糊集理论被广泛的应用于解决模糊信息下的评价问题.基于模糊集理论,Torra^[14]提出了犹豫模糊集概念,并研究了其与直觉模糊集的关系.犹豫模糊集体现了决策者在决策时的不确定性,相比传统的模糊集理论,包含了更多的不同表现形式的信息^[15-16].Xu等^[17]提出了犹豫模糊熵的概念,并给出了相关的几种测度公式.Hu等^[18]提出了一系列犹豫模糊信息的信息度量方法,包括距离、相似性和熵度量等.此外,犹豫模糊集在表达个体犹豫思维问题^[19]及实现联合决策^[20]等方面存在独特的优势.

本文利用犹豫模糊集来处理制造过程多因素重要度评价问题,提出了一种结合犹豫模糊熵与成对比较矩阵的最优组合赋权法来确定评价指标权重,并利用犹豫模糊TOPSIS模型来定量度量各因素的重要度值.最终结合过程因素期望指数和各因素的重要度值,提出了制造过程期望指数的计算公式和评价等级表,从而完成了整个制造过程的多指标定量综合评价体系.

1 制造过程多指标定量评价体系的建立

制造过程各影响因素的水平决定了零件最终的加工质量,因此需要严格控制各项评价参数,做到系统变异可控.对影响制造过程的人、机、料、法、环、测六个因素进行具体分析,以提高加工质量和具有可操作性为目标,制定各个因素定量评价指标,最终形成制造过程的多指标定量评价体系.

1.1 人员因素量化指标

根据HFACS人员因素分析模型^[21-23]将人员因素对事故潜在或明显的失误划分为不安全行为、不安全行为的前提条件、不安全的监督和组织影响四个层次.结合制造过程的人员因素失误分析,对企业一、二、三线人员^[24]行为因素进行层次划分,以便于对实际生产过程中各种人员因素失误进行有效预防及控制.制造过程人员因素分析与分类系统如图1所示.

对于人员因素的控制要根据不同类型的人员在制造过程中的行为和影响,分别制定多维度评价指标,人员因素的定量评价指标如表1所示.

表1 人员因素定量评价指标

Tab.1 Quantitative evaluation indexes of personnel factor			
人员因素维度	编号	指标	说明
一线人员	a_1	技能水平合格率	定期考评中技能水平合格的工人占比
	a_2	质量意识及精细化操作培训率	接受质量意识及精细化操作培训的工人占比
	a_3	无失误行为率	每月未出现差错和违规行为的工人占比
	a_4	身体合格率	身体检测合格的工人占比
	a_5	心理合格率	心理检测合格的工人占比
	a_6	班组长满意度	对班组长满意的工人占比
二线人员	a_7	检验人员技能水平合格率	定期考评中技能水平合格的检验人员占比
	a_8	调度满意度	对调度计划满意的工人占比
三线人员	a_9	设计人员技能水平合格率	定期考评中技能水平合格的设计人员占比
	a_{10}	管理课程培训率	接受管理课程培训的管理人员占比

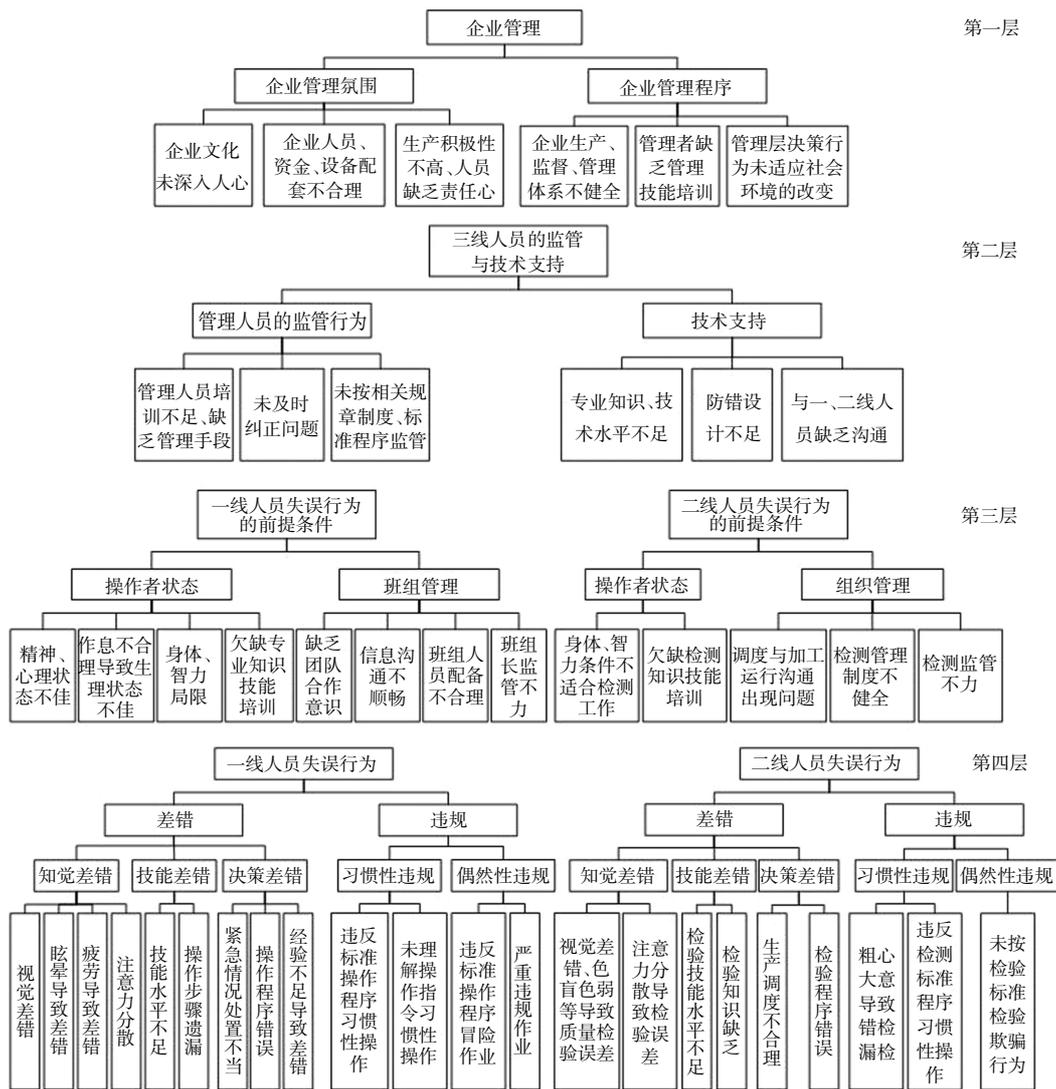


图 1 制造过程人员因素分析与分类系统

Fig.1 Personnel factor analysis and classification system in manufacturing process

1.2 设备因素量化指标

设备因素主要以全员生产维修(Total Productive Maintenance, TPM)^[25]为技术指导,以关键设备的采购管理和使用管理为对象进行量化指标评价,如图 2

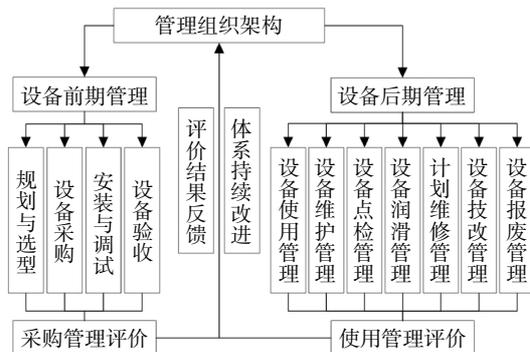


图 2 设备因素控制体系架构

Fig.2 Equipment factor control architecture

所示,从而保证设备满足加工需求并能以良好的运行状态来完成加工过程.

基于过程管理方法针对设备因素各维度制定定量评价指标如表 2 所示,根据评价结果为管理人员反馈当前设备因素状态,从而进行针对性的改进循环良性过程.

1.3 材料因素量化指标

材料因素的定量评价主要是以对材料的属性控制和缺陷预防为目的,在材料的采购、复检、贮存、冷热加工等阶段进行定点定量控制,从而保证材料在加工过程中具有良好的使用性和工艺性.

针对材料因素的关键控制点制定定量评价指标如表 3 所示,通过各项指标的数值直观反映材料因素在各个环节中的状态,从而为管理人员控制生产过程追溯质量问题提供依据.

表 2 设备因素定量评价指标

Tab.2 Quantitative evaluation indexes of equipment factor

设备因素维度	编号	指标	说明
设备采购管理	b_1	设备需求满足度	设备的加工能力与加工需求的吻合程度
	b_2	设备使用率	设备实际使用时间占计划用时的百分比
	b_3	设备定期维护执行率	按计划对设备进行维护的执行完成占比
设备使用管理	b_4	设备定期点检执行率	按照定点、定法、定标、定期、定人的方法对设备进行全面检查和诊断,找出设备的异状,发现隐患的行为完成占比
	b_5	设备定期润滑作业执行率	按计划对设备进行润滑作业的执行完成占比
	b_6	正常使用时间占比	设备正常工作包括正常工作、维护等时间占比,用以表征设备故障停机时间

表 3 材料因素定量评价指标

Tab.3 Quantitative evaluation indexes of material factor

材料因素维度	编号	指标	说明
材料采购控制	c_1	外购件采购与需求匹配度	外购件的性能指标与需求的吻合程度
	c_2	材料入厂检验执行率	材料入厂时进行检验的执行完成占比
材料复检控制	c_3	材料入库前复检执行率	材料入库前进行复检的执行完成占比
	c_4	材料使用前复检执行率	材料在使用前进行复检的执行完成占比
材料贮存控制	c_5	材料贮存环境指标达标时间占比	材料贮存时环境指标达到标准的时间占总贮存时间的比值
	c_6	材料贮存定期检测执行率	按计划对材料贮存进行检验的执行完成占比
	c_7	材料批次管理记录完整占比	材料批次管理记录各项记录无缺失占比,以保证可追溯性
	c_8	铸造成品率	铸造合格零件与炉料的比例
材料冷热加工控制	c_9	锻造合格率	锻造时合格零件占总零件数的比例
	c_{10}	切削加工零件合格率	切削加工时零件合格产品的比例
	c_{11}	零件热处理达标率	零件热处理达到标准的比例
	c_{12}	焊接合格率	焊接零件达到合格标准的比例

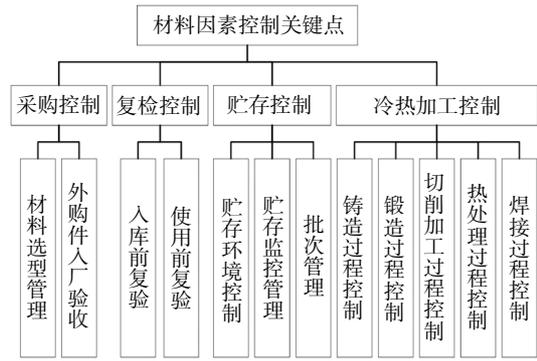


图 3 材料因素关键控制点

Fig.3 Critical control point of material factor

1.4 方法因素量化指标

方法因素包括制造过程中的技术类方法和管理类方法,技术类方法是零件在设计、加工、装配、试验等阶段所用到的各类工艺、标准、规范等,管理类方法主要是企业的质量管理体系和 6s 现场管理方法等。方法的科学性和完整性是制造过程稳定进行的基本保障.因此针对方法因素关键控制点制定定量评价指标如表 4 所示。

表 4 方法因素定量评价指标

Tab.4 Quantitative evaluation indexes of method factor

方法因素维度	编号	指标	说明
技术方法	d_1	设计方法评审满意度	针对设计方法的评审达到预期满意的程度
	d_2	加工方法评审满意度	针对加工方法的评审达到预期满意的程度
	d_3	装配方法评审满意度	针对装配方法的评审达到预期满意的程度
	d_4	试验方法评审满意度	针对试验方法的评审达到预期满意的程度
管理方法	d_5	6s 现场管理执行率	每个评价周期内 6s 现场管理执行率
	d_6	企业质量管理体系评审满意度	针对企业质量管理体系评审达到预期满意的程度

1.5 环境因素量化指标

环境因素主要是制造过程中的作业现场和零件仓库的温度、湿度、空气洁净度等指标.环境条件对高精度加工和装配有着至关重要的作用,因此对环境因素的各项指标需要严格定量控制,定量评价指标如表 5 所示。

表 5 环境因素定量评价指标

Tab.5 Quantitative evaluation indexes of environment factor

环境因素维度	编号	指标	说明
作业现场	e_1	作业现场布置评分合格率	每个评价周期内根据 6s 现场管理要求,对作业现场的评估合格占比
温度	e_2	温度合格时间占比	恒温车间、零件仓库各项温度参数符合要求时间占比
湿度	e_3	湿度合格时间占比	恒温车间、零件仓库各项湿度参数符合要求时间占比
空气洁净度	e_4	空气洁净度达标时间占比	作业现场空气洁净度等级达到要求标准时间占比
电网波动	e_5	电压满足工作需求时间占比	车间现场工作电压维持在正常范围内时间占比
振动	e_6	振动参数达标时间占比	高精度机床振动幅度和频率达到标准时间占比
噪声	e_7	噪声达标时间占比	作业现场噪声维持在标准范围内时间占比
照明条件	e_8	照明条件达标时间占比	作业现场照明条件维持在标准范围内时间占比
通风条件	e_9	通风条件达标时间占比	作业现场通风条件维持在标准范围内时间占比

1.6 测量因素量化指标

测量因素是制造过程中被测对象的测量值接近真实值的基本保证,只有稳定有效的测量系统才能保证测量结果的准确性.测量因素的评价主要从测量设备、测量程序和测量环境来进行定点定量控制,定量评价指标如表 6 所示.

表 6 测量因素定量评价指标

Tab.6 Quantitative evaluation indexes of measurement factor

测量因素维度	编码	指标	说明
测量设备	f_1	精度匹配度	测量设备的精度与测量需求的匹配程度
	f_2	定期校验合格率	定期校验达到测量要求的测量设备占比
测量程序	f_3	测量程序文件评审满意度	针对测量程序文件的评审达到预期满意的程度
	f_4	复核检验执行率	按计划完成复合检验行为占比
	f_5	复检时无错漏占比	复检时无错检漏检行为占比
	f_6	测量记录完整度	测量记录填写完全占比
测量环境	f_7	检定温度参数合格时间占比	测量时各项温度参数符合要求时间占比
	f_8	测量仪器平衡温度时间合格率	测量仪器在测量前所需要平衡温度的时间符合规定占比
	f_9	湿度达标时间占比	测量时空气湿度符合要求时间占比
	f_{10}	大气压力达标时间占比	测量时大气压力符合要求时间占比
	f_{11}	空气洁净度达标时间占比	测量时空气洁净度等级达到标准要求时间占比
	f_{12}	零件洁净度达标率	测量时洁净度指标符合要求的零件占比

2 综合评价方法的运算过程

2.1 过程因素期望指数概念

制造过程各个影响因素包含了若干个评价指标,为了能直观评价各影响因素的状态,给决策者提供定量的评价值,因此将各过程影响因素距离期望值的偏差程度定义为过程因素期望指数(Process factor expectation index, PF),用以对各因素各项评价统计结果进行分析,计算过程如下:

首先,将人员、设备、材料、方法、环境、测量各因素评分表示为:

$$A_{PER} = (a_1, a_2, \dots, a_p); B_{EQP} = (b_1, b_2, \dots, b_o);$$

$$C_{MAT} = (c_1, c_2, \dots, c_k); D_{METH} = (d_1, d_2, \dots, d_x);$$

$$E_{ENV} = (e_1, e_2, \dots, e_y); F_{MEAS} = (f_1, f_2, \dots, f_z);$$

式中: p, o, k, x, y, z 分别表示各因素中各项指标序号.然后,为了最大程度反映各因素与期望之间的差距,采用标准离差平方和公式来计算各过程因素期望指数.

人员因素期望指数:

$$PF_{PER} = \sqrt{\frac{\sum_i^p (a_i - E_a)^2}{p \times \max(a - E_a)^2}}, i=1, 2, \dots, p \quad (1)$$

式中: E_a 表示人员因素各项评价指标的期望值, $\max(a - E_a)$ 表示各项评价指标的实际值与期望值所允许的最大差值,也就是实际值与最低期望值的差值,当实际值低于最低期望值时,视为该项指标不合格应直接进行整改.

设备因素期望指数:

$$PF_{EQP} = \sqrt{\frac{\sum_i^o (b_i - E_b)^2}{o \times \max(b - E_b)^2}}, i=1, 2, \dots, o \quad (2)$$

材料因素期望指数:

$$PF_{MAT} = \sqrt{\frac{\sum_i^k (c_i - E_c)^2}{k \times \max(c - E_c)^2}}, i=1, 2, \dots, k \quad (3)$$

方法因素期望指数:

$$PF_{METH} = \sqrt{\frac{\sum_i^x (d_i - E_d)^2}{x \times \max(d - E_d)^2}}, i=1, 2, \dots, x \quad (4)$$

环境因素期望指数:

$$PF_{ENV} = \sqrt{\frac{\sum_i^y (e_i - E_e)^2}{y \times \max(e - E_e)^2}}, i=1, 2, \dots, y \quad (5)$$

测量因素期望指数:

$$PF_{MEAS} = \sqrt{\frac{\sum_i^z (f_i - E_f)^2}{z \times \max(f - E_f)^2}}, i=1, 2, \dots, z \quad (6)$$

为了更直观评定各过程因素期望指数, 根据统计分布情况将期望指数划分为五个等级, 如表 7 所示.

表 7 过程因素期望指数等级表

Tab.7 Process factor expectation index rating scale

等级	范围	判断	等级分析
特级	[0, 0.35]	过程因素与期望非常接近	过程因素各指标实际值接近期望值, 理想状态, 应当保持
一级	(0.35, 0.60]	过程因素与期望较接近	过程因素各指标实际值与期望值较接近, 应针对实际值低的指标进行合理的改进
二级	(0.60, 0.75]	过程因素与期望一般接近	过程因素大部分指标与期望值偏差较大, 应对实际值低的指标予以立即改进
三级	(0.75, 0.90]	过程因素与期望较远	过程因素各指标普遍偏离期望值, 对制造过程影响很大, 应立即出具分析报告进行讨论, 并立刻进行改进
四级	(0.90, 1]	过程因素与期望远离	过程因素各指标状态差, 不可接受

2.2 确定过程因素重要度评价指标

令人员、设备、材料、方法、环境、测量各因素分别表示为 $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\}$, 为了对各因素进行重要度评定, 提出了控制难易程度、控制成本、费效比、稳定性、对零件精度敏感性 5 个评价指标, 表示为 $D = \{d_1, d_2, d_3, d_4, d_5\}$, 其属性权重向量 $\omega = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5, \omega_6\}^T$ 未知, 且要求满足 $\sum_{i=1}^5 \omega_j = 1, \omega_j > 0$. 其中属性 d_1, d_2, d_3 为成本型属性, 即属性值越小该因素权重越大; d_4, d_5 为效益型, 即属性值越大该因素权重越大. 也就是说控制难易程度越小、控制成本越低、费效比越低, 该因素的重要度就越大; 稳定性越

高、对零件精度敏感性越大, 该因素的重要度就越大.

决策者的评价结果以犹豫模糊数 h_{ij} ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$) 表示各因素 x_i 在评价指标 d_j 下的属性值, 并构造犹豫模糊评价矩阵 $R = (h_{ij})_{m \times n}$, 且有 $h_{ij} = H\{\gamma_{ij}^1, \gamma_{ij}^2, \dots, \gamma_{ij}^{l_{ij}}\}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$, 其中 l_{ij} 表示犹豫模糊数中 h_{ij} 元素的个数.

2.3 计算重要度评价指标权重

熵与犹豫模糊集理论相结合从而产生了犹豫模糊熵, 犹豫模糊熵在权重确定中的意义在于, 犹豫模糊熵越大, 决策者对于评价结果的判断越模糊不确定, 说明决策者对评价指标相对比较难判断, 从而赋予的权重也应较小; 反之, 犹豫模糊熵越小, 赋予的权重也应越大. 熵权法通过对评价数据本身信息量进行提取分析来确定权重大小, 具有很强的客观性, 但当评价信息差异程度小的时候, 根据犹豫模糊熵所得到的权重的准确性将会降低, 因此本文采用最优组合赋权法来确定评价指标的最终权重. 计算步骤为:

Step1 由于评价指标包含成本型属性和效益型属性, 为了消除不同量纲对评价结果的影响, 采用规范化方法将成本型属性转化成效益型属性, 即:

$$\bar{h}_{ij} = \begin{cases} h_{ij}, & \text{对于效益型属性} \\ h_{ij}^c, & \text{对于成本型属性} \end{cases} \quad (7)$$

式中: h_{ij}^c 是犹豫模糊数 h_{ij} 的补运算;

即 $h_{ij}^c = U_{\gamma \in h_{ij}} \{1 - \gamma\} = H\{1 - \gamma_{ij}^1, 1 - \gamma_{ij}^2, \dots, 1 - \gamma_{ij}^{l_{ij}}\}$;

即 $\bar{h}_{ij} = H\{\bar{\gamma}_{ij}^1, \bar{\gamma}_{ij}^2, \dots, \bar{\gamma}_{ij}^{l_{ij}}\}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$.

从而得到标准化犹豫模糊评价矩阵:

$$\bar{R} = (\bar{h}_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} \bar{h}_{11} & \bar{h}_{12} & \dots & \bar{h}_{1n} \\ \bar{h}_{21} & \bar{h}_{22} & \dots & \bar{h}_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \bar{h}_{m1} & \bar{h}_{m2} & \dots & \bar{h}_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Step2 根据犹豫模糊熵计算公式^[17]对各评价指标的熵 E_{ij} 进行计算:

$$E_{ij} = 1 - \frac{2}{l_{ij} T} \sum_{i=1}^{l_{ij}} \left(\frac{(1 + q\alpha_{\sigma(i)}) \ln(1 + q\alpha_{\sigma(i)}) + (1 + q(1 - \alpha_{\sigma(l_{ij}-i+1)})) \ln(1 + q(1 - \alpha_{\sigma(l_{ij}-i+1)}))}{2} - \frac{2 + q\alpha_{\sigma(i)} + q(1 - \alpha_{\sigma(l_{ij}-i+1)})}{2} \ln \frac{2 + q\alpha_{\sigma(i)} + q(1 - \alpha_{\sigma(l_{ij}-i+1)})}{2} \right), q > 0 \quad (9)$$

式中: $\alpha_{\sigma(l)}$ 表示犹豫模糊数 \bar{h}_{ij} 中第 l 大的元素, l_{ij} 表示犹豫模糊数 \bar{h}_{ij} 中元素的个数, 且有:

$$T = (1+q)\ln(1+q) - (2+q)(\ln(2+q) - \ln 2) \quad (10)$$

Step3 计算第 j 项评价指标的熵权为:

$$w'_j = \frac{1 - E_j}{n - \sum_{j=1}^n E_j}, j = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

式中: $E_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m E_{ij}, j = 1, 2, \dots, n$

得到评价指标的熵权向量:

$$w'_j = (w'_1, w'_2, \dots, w'_n)^T \quad (12)$$

Step4 根据成对比较矩阵得到主观权重 w_j^* .

首先, 定义各项评价指标的比较标准, 如表 8 所示.

表 8 评价指标两两比较标准

Tab.8 The evaluation standard of comparison between every two indexes

评价指标 d_j 与 d_j 的相对偏好	标度
d_j 比 d_j 很重要	9
d_j 比 d_j 重要	7
d_j 比 d_j 较重要	5
d_j 比 d_j 稍微重要	3
d_j 与 d_j 同等重要	1

此外, 上述相邻判断标度的中间值记为 2、4、6、8, 若 d_j 与 d_j 的重要度之比为 $I_{jj'}$, 则 d_j 与 d_j 的重要度之比为 $I_{jj} = \frac{1}{I_{jj'}}$.

然后, 决策成员根据比较标准给出各项评价指标重要度, 得到成对比较矩阵 I :

$$I = \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & I_{13} & I_{14} & I_{15} \\ I_{21} & I_{22} & I_{23} & I_{24} & I_{25} \\ I_{31} & I_{32} & I_{33} & I_{34} & I_{35} \\ I_{41} & I_{42} & I_{43} & I_{44} & I_{45} \\ I_{51} & I_{52} & I_{53} & I_{54} & I_{55} \end{bmatrix} \quad (13)$$

此时, 需要先对成对比较矩阵进行一致性检验: 根据计算, 得到成对比较矩阵的最大特征根为 λ_{\max} , 则得到一致性指标 (Consistency Index) $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$, 并查表得到随机一致性指标 (Random Index) RI ; 当一致性比率 (Consistency Ratio) $CR = \frac{CI}{RI} < 0.1$ 时, 则成对比较矩阵通过一致性检验, 可直接用来计算主观权重.

再将成对比较矩阵的每一列元素进行归一化处理:

$$\bar{I}_{j'j} = I_{j'j} / \sum_{j=1}^n I_{j'j}, j, j' = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

将归一化的成对比较矩阵按行相加:

$$\bar{w}_j = \sum_{j'=1}^n \bar{I}_{j'j}, j, j' = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

对向量 $\bar{w}_j = (\bar{w}_1, \bar{w}_2, \dots, \bar{w}_n)^T$ 进行归一化处理:

$$w_j = \bar{w}_j / \sum_{j=1}^n \bar{w}_j, j = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

最终计算得到主观权重:

$$w_j^* = (w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*)^T \quad (17)$$

Step5 令最优组合权重:

$$w_j^* = k_1 w_j^* + k_2 w_j^* \quad (18)$$

式中: $k_1, k_2 \geq 0$ 为组合系数, 且满足单位化约束条件 $k_1^2 + k_2^2 = 1$, 则可得各因素的多指标综合评价价值为:

$$D_j = \sum_{j=1}^m \bar{h}_{ij} w_j^*, i = 1, 2, \dots, m \quad (19)$$

在评价过程中, 如果各因素的多指标综合评价价值相互差别较小, 则各因素排序的意义就不大. 为了使得评价对象之间的差异最大化, 即使得综合评价价值 D_j 分散程度最大, 本文采用各因素多指标综合评价价值之间的离差平方和最大来实现.

令 $v_i(w_j^*)$ 表示第 i 个因素与其他因素多指标综合评价价值之间的离差平方和, 则计算公式为:

$$v_i(w_j^*) = \sum_{i'=1}^m \left(\sum_{j=1}^n (\bar{h}_{ij} - \bar{h}_{i'j}) w_j^* \right)^2 = \sum_{i'=1}^m \left(\sum_{j=1}^n (\bar{h}_{ij} - \bar{h}_{i'j}) (k_1 w_j^* + k_2 w_j^*) \right)^2 \quad (20)$$

从而, 各因素多指标综合评价价值之间的离差平方总和为:

$$V(w_j^*) = \sum_{i=1}^m v_i(w_j^*) = \sum_{i=1}^m \sum_{i'=1}^m \left(\sum_{j=1}^n (\bar{h}_{ij} - \bar{h}_{i'j}) (k_1 w_j^* + k_2 w_j^*) \right)^2 \quad (21)$$

其中 $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$.

于是问题就转变为确定 k_1, k_2 的值, 使得 $V(w_j^*)$ 取最大值, 继而就转化为求解以下最优化问题:

$$\begin{cases} \max F(k_1, k_2) = \sum_{i=1}^m \sum_{i'=1}^m \left(\sum_{j=1}^n (\bar{h}_{ij} - \bar{h}_{i'j}) (k_1 w_j^* + k_2 w_j^*) \right)^2 \\ k_1^2 + k_2^2 = 1 \\ k_1 \geq 0, k_2 \geq 0 \end{cases} \quad (22)$$

其中,由于犹豫模糊矩阵在最优化问题中的运算规则过于繁琐,这里以取平均数的方式进行简化.由于传统的加权向量一般都满足归一化约束条件而不是单位化约束条件,因此还需要对由上式解得的 k_1' 、 k_2' 进行归一化处理可得:

$$k_1 = \frac{k_1'}{k_1' + k_2'}, k_2 = \frac{k_2'}{k_1' + k_2'} \quad (23-24)$$

最终得到最优组合权重并进行标准化:

$$w_j^* = \frac{k_1 w_{j1} + k_2 w_{j2}}{\sum_{j=1}^n (k_1 w_{j1} + k_2 w_{j2})} \quad (25)$$

运用 Matlab 求解得到标准化最优组合权重向量:

$$w_j^* = (w_1^*, w_2^*, \dots, w_j^*)^T \quad (26)$$

2.4 得到过程因素相对权重

在确定评价指标权重以后,本文采用犹豫模糊 TOPSIS 决策法来对制造过程各因素进行排序,并计算人员、设备、材料、方法、环境、测量各因素权重指数,步骤如下:

Step1 根据 Xu 等^[26]给出的拓展规则对元素个数相对较少的犹豫模糊数进行拓展,使其具有相同的元素个数,拓展规则为重复增加犹豫模糊数中最小的元素.然后,将最优组合权重矩阵 W^* 右乘标准化犹豫模糊评价矩阵 \bar{R} ,得到加权犹豫模糊评价矩阵 $\tilde{R} = (\tilde{h}_{ij})_{m \times n}$.

Step2 确定犹豫模糊正理想解 x^+ 和犹豫模糊负理想解 x^- ,则有:

$$\begin{aligned} x^+ = \{d_j, \max_{\lambda=1}^m \langle \tilde{h}_{ij}^\lambda \rangle | j=1, 2, \dots, n; \lambda=1, 2, \dots, l_{ij}\} = \\ \{ \langle d_1, H\{(\tilde{\gamma}_1^1)^+, (\tilde{\gamma}_1^2)^+, \dots, (\tilde{\gamma}_1^{l_1})^+\} \rangle, \\ \langle d_2, H\{(\tilde{\gamma}_2^1)^+, (\tilde{\gamma}_2^2)^+, \dots, (\tilde{\gamma}_2^{l_2})^+\} \rangle, \dots, \\ \langle d_n, H\{(\tilde{\gamma}_n^1)^+, (\tilde{\gamma}_n^2)^+, \dots, (\tilde{\gamma}_n^{l_n})^+\} \rangle \} \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} x^- = \{d_j, \min_{\lambda=1}^m \langle \tilde{h}_{ij}^\lambda \rangle | j=1, 2, \dots, n; \lambda=1, 2, \dots, l_{ij}\} = \\ \{ \langle d_1, H\{(\tilde{\gamma}_1^1)^-, (\tilde{\gamma}_1^2)^-, \dots, (\tilde{\gamma}_1^{l_1})^- \} \rangle, \\ \langle d_2, H\{(\tilde{\gamma}_2^1)^-, (\tilde{\gamma}_2^2)^-, \dots, (\tilde{\gamma}_2^{l_2})^- \} \rangle, \dots, \\ \langle d_n, H\{(\tilde{\gamma}_n^1)^-, (\tilde{\gamma}_n^2)^-, \dots, (\tilde{\gamma}_n^{l_n})^- \} \rangle \} \end{aligned} \quad (28)$$

Step3 用犹豫模糊欧几里得距离测度分别计算每一个因素与犹豫模糊正理想解和犹豫模糊负理想解之间的距离.令 $D(x_i, x^+)$ 和 $D(x_i, x^-)$ 分别表示因素 x_i 与犹豫模糊正理想解 x^+ 和犹豫模糊负理想解 x^- 之间的距离,即

$$\begin{aligned} D(x_i, x^+) = \sum_{j=1}^n d_E(\tilde{h}_{ij}, (\tilde{h}_j^+)^+) = \\ \sum_{j=1}^n \sqrt{\frac{1}{l_{ij}} \sum_{\lambda=1}^{l_{ij}} (\tilde{\gamma}_{ij}^\lambda - (\tilde{\gamma}_j^+)^+)^2}, i=1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} D(x_i, x^-) = \sum_{j=1}^n d_E(\tilde{h}_{ij}, (\tilde{h}_j^-)^-) = \\ \sum_{j=1}^n \sqrt{\frac{1}{l_{ij}} \sum_{\lambda=1}^{l_{ij}} (\tilde{\gamma}_{ij}^\lambda - (\tilde{\gamma}_j^-)^-)^2}, i=1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (30)$$

Step4 计算每个因素相对于犹豫模糊正理想解 x^+ 的相对贴近度.由于传统的模糊 TOPSIS 方法着重满足相对贴近度值离正理想解最近、并未满足同时距离负理想解最远,因此本文采用 Hadi-Venche 等^[27]所提出的改进后相对贴近度公式:

$$\text{令: } D_{\min}(x_i, x^+) = \min_{1 \leq i \leq m} D(x_i, x^+) \quad (31)$$

$$D_{\max}(x_i, x^-) = \max_{1 \leq i \leq m} D(x_i, x^-) \quad (32)$$

则各因素与犹豫模糊正理想解 x^+ 的改进型相对贴近度值:

$$RC(x_i) = \frac{D(x_i, x^-)}{D_{\max}(x_i, x^-)} - \frac{D(x_i, x^+)}{D_{\min}(x_i, x^+)} \quad (33)$$

Step5 根据相对贴近度值 $RC(x_i)$ 距离最小相对贴近度值 $RC(x)_{\min}$ 的远近程度可对人员、设备、材料、方法、环境、测量各因素重要度进行排序.其中,最小相对贴近度值 $RC(x)_{\min}$ 计算公式为:

$$RC(x)_{\min} = \frac{D_{\min}(x_i, x^+)}{D_{\max}(x_i, x^-)} - \frac{D_{\max}(x_i, x^-)}{D_{\min}(x_i, x^+)} \quad (34)$$

则可通过 $RC(x_i)$ 与 $RC(x)_{\min}$ 的距离来定量度量各因素的重要度值并对结果归一化处理,计算公式为:

$$Im(x_i) = \frac{RC(x_i) - RC(x)_{\min}}{\sum_{i=1}^m (RC(x_i) - RC(x)_{\min})} \quad (35)$$

最终计算得到人员、设备、材料、方法、环境、测量各因素重要度值.

2.5 定义制造过程期望指数

为了综合体现制造过程的水平,将制造过程当前状态距离理想状态的偏离程度定义为制造过程期望指数 (manufacturing process expectation index, MP),其计算公式如下:

$$\begin{aligned} MP = PF_{PER} \times Im(x_1) + PF_{EQP} \times Im(x_2) + \\ PF_{MAT} \times Im(x_3) + PF_{METH} \times Im(x_4) + \\ PF_{ENV} \times Im(x_5) + PF_{MEAS} \times Im(x_6) \end{aligned} \quad (36)$$

并且给出制造过程期望指数等级表如表 9 所示.

表 9 制造过程期望指数等级表

Tab.9 Manufacturing process expectation index rating scale

等级	范围	判断	等级分析
特级	[0,0.35]	制造过程接近理想状态	零件制造过程处于理想状态,应当保持
一级	(0.35,0.60]	制造过程与理想状态较接近	零件制造过程稍微偏离理想状态,应通过改进尽力提升到特级
二级	(0.60,0.75]	制造过程与理想状态一般接近	零件制造过程水平一般,部分影响因素控制不好,应对期望指数等级低的因素予以立即改进
三级	(0.75,0.90]	制造过程较偏离理想状态	零件制造过程各因素控制情况较差,对零件加工质量影响很大,应立即出具分析报告进行讨论,并立刻进行改进
四级	(0.90,1]	制造过程偏离理想状态	零件制造过程控制太差,不可接受

3 实例分析

为了进一步说明该方法的适用性和实施过程,本文对某数控转台制造工厂的转台制造过程进行评价.

3.1 数控转台制造过程多指标评价体系

根据前面的各因素评价指标对数控转台制造过程进行定量评价,得到各因素的评价值如表 10 所示.

表 10 各因素定量指标评价

Tab.10 The quantitative indexes evaluation values of each factor

人员因素		设备因素		材料因素		方法因素		环境因素		测量因素	
编号	评价值	编号	评价值	编号	评价值	编号	评价值	编号	评价值	编号	评价值
a_1	0.95	b_1	1.00	c_1	1.00	d_1	0.92	e_1	0.85	f_1	1
a_2	0.80	b_2	0.85	c_2	1.00	d_2	0.92	e_2	1	f_2	0.96
a_3	0.86	b_3	1.00	c_3	0.95	d_3	0.95	e_3	1	f_3	0.95
a_4	1.00	b_4	0.87	c_4	1.00	d_4	0.95	e_4	1	f_4	1
a_5	1.00	b_5	1.00	c_5	1.00	d_5	0.82	e_5	0.95	f_5	0.98
a_6	0.92	b_6	0.89	c_6	1.00	d_6	0.82	e_6	0.86	f_6	1
a_7	0.90			c_7	0.93			e_7	1	f_7	1
a_8	0.90			c_8	0.96			e_8	1	f_8	1
a_9	1.00			c_9	0.95			e_9	1	f_9	1
a_{10}	0.96			c_{10}	0.98					f_{10}	1
				c_{11}	0.92					f_{11}	1
				c_{12}	1					f_{12}	0.92

3.2 计算过程因素期望指数

根据公式(1)~(6),取各因素各项评价指标实际值与期望值所允许的最大差值为 0.2,从而计算得到表 11.

通过过程因素期望指数等级表可知,材料和测量因素为特级属于理想状态,应当保持,而人员因素、设备因素、方法因素和环境因素为一级状态,决策者需要根据实际加工需求和生产成本,对实际值低的指标进行合理改进.对于人员因素而言,评价值最低的两项为质量意识及精细化操作培训率和无失误行为率,主要原因是新入职的人员只接受了岗位培训还未接受进一步的精益生产相关培训,并且大多数失误行为也是这些人员对操作流程不熟悉导致的,因此在下一步计划中重点安排新职员的培训工作.对于设备因素而言,评价值较低的几项为设备使用率、定期点检执行率、正常使用时间占比,主要原因是部分老旧设备停机故障导致,因此在下一阶段对这部分设备加工能力进行评估,针对可修复的机器进行一次全面检修.方法因素中评价值较低的主要是现场管理执行率和管理体系评审满意度,主要原因是当前订单量的增大导致员工工作量增加,对于车间现场 6s 管理出现了松懈,各项管理制度并未完全按照规定执行,因此需要增强员工质量意识,督促班组长要严格执行现场管理的打分工作.环境因素中的主要问题是车间现场出现油污杂物、工具随意

摆放、多余零件未按规定存放等问题,因此下一步根据现场 6 s 打分情况制定奖惩措施,以起到督促员工现场管理意识。

表 11 过程因素期望指数
Tab.11 The process factor expectation indexes

PF _{PER}	PF _{EQP}	PF _{MAT}	PF _{METH}	PF _{ENV}	PF _{MEAS}
0.474 6	0.463 2	0.195 3	0.586 7	0.352 0	0.150 7

3.3 过程因素重要度评价矩阵

决策者的犹豫模糊评价矩阵如表 12 所示,矩阵中犹豫模糊数 $H\{0.8,0.9\}$ 表示人员因素 x_1 在控制难易程度 d_1 下的评估值可能是 0.8 或 0.9,其他犹豫模糊数具有相似意义。

$$\bar{R} = \begin{bmatrix} \{0.1,0.2\} & \{0.5,0.7\} & \{0.2,0.3\} & \{0.2,0.3,0.4\} & \{0.7,0.9\} \\ \{0.2,0.3,0.5\} & \{0.2\} & \{0.3,0.5\} & \{0.6,0.8\} & \{0.8,0.9\} \\ \{0.2,0.4\} & \{0.6,0.7,0.8\} & \{0.2,0.4,0.6\} & \{0.5,0.7,0.8\} & \{0.5,0.7,0.8\} \\ \{0.6,0.7\} & \{0.6,0.8\} & \{0.7\} & \{0.8,0.9\} & \{0.6,0.7,0.8\} \\ \{0.7,0.8\} & \{0.3,0.4,0.6\} & \{0.5,0.6\} & \{0.3,0.4\} & \{0.9\} \\ \{0.5,0.6,0.7\} & \{0.3,0.5\} & \{0.3,0.4,0.6\} & \{0.3,0.4,0.6\} & \{0.7,0.8,0.9\} \end{bmatrix}$$

Step2 取 $q=2^{17}$ 则计算得到犹豫模糊熵矩阵:

$$E = \begin{bmatrix} 0.520 4 & 0.961 3 & 0.757 9 & 0.845 0 & 0.646 8 \\ 0.889 8 & 0.650 6 & 0.961 3 & 0.844 5 & 0.520 4 \\ 0.844 5 & 0.845 0 & 0.919 5 & 0.889 8 & 0.889 8 \\ 0.913 5 & 0.844 5 & 0.846 1 & 0.520 4 & 0.845 0 \\ 0.757 9 & 0.980 7 & 0.990 4 & 0.913 5 & 0.371 0 \\ 0.961 5 & 0.961 3 & 0.980 7 & 0.961 5 & 0.648 1 \end{bmatrix}$$

Step3 计算得到评价指标的熵权向量:

$$w_j' = (0.814 6, 0.873 9, 0.909 3, 0.829 1, 0.653 5)^T$$

Step4 根据决策者的主观评价得到成对比较矩阵为:

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 1/5 & 1/3 & 1 & 4 \\ 5 & 1 & 2 & 5 & 8 \\ 3 & 1/2 & 1 & 3 & 5 \\ 1 & 1/5 & 1/3 & 1 & 3 \\ 1/4 & 1/8 & 1/5 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

表 13 加权犹豫模糊评价矩阵

Tab.13 The weighted hesitant fuzzy evaluation matrix

	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
x_1	{0.019 46,0.019 46,0.038 92}	{0.114 65,0.114 65,0.160 51}	{0.045 06,0.045 06,0.067 59}	{0.039 48,0.059 22,0.078 96}	{0.107 31,0.107 31,0.137 97}
x_2	{0.038 92,0.058 38,0.097 30}	{0.045 86,0.045 86,0.045 86}	{0.067 59,0.067 59,0.112 65}	{0.118 44,0.118 44,0.157 92}	{0.122 64,0.122 64,0.137 97}
x_3	{0.038 92,0.038 92,0.077 84}	{0.137 58,0.160 51,0.183 44}	{0.045 06,0.090 12,0.135 18}	{0.098 70,0.138 18,0.157 92}	{0.076 65,0.107 31,0.122 64}
x_4	{0.116 76,0.116 76,0.136 22}	{0.137 58,0.137 58,0.183 44}	{0.157 71,0.157 71,0.157 71}	{0.157 92,0.157 92,0.177 66}	{0.091 98,0.107 31,0.122 64}
x_5	{0.136 22,0.136 22,0.155 68}	{0.068 79,0.091 72,0.137 58}	{0.112 65,0.112 65,0.135 18}	{0.059 22,0.059 22,0.078 96}	{0.137 97,0.137 97,0.137 97}
x_6	{0.973 0,0.116 76,0.136 22}	{0.068 79,0.068 79,0.114 65}	{0.067 59,0.090 12,0.135 18}	{0.059 22,0.078 96,0.098 70}	{0.107 31,0.122 64,0.137 97}

表 12 犹豫模糊评价矩阵

Tab.12 The hesitant fuzzy evaluation matrix

	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
x_1	{0.8,0.9}	{0.3,0.5}	{0.7,0.8}	{0.2,0.3,0.4}	{0.7,0.9}
x_2	{0.5,0.7,0.8}	{0.8}	{0.5,0.7}	{0.6,0.8}	{0.8,0.9}
x_3	{0.6,0.8}	{0.2,0.3,0.4}	{0.4,0.6,0.8}	{0.5,0.7,0.8}	{0.5,0.7,0.8}
x_4	{0.3,0.4}	{0.2,0.4}	{0.3}	{0.8,0.9}	{0.6,0.7,0.8}
x_5	{0.2,0.3}	{0.4,0.6,0.7}	{0.4,0.5}	{0.3,0.4}	{0.9}
x_6	{0.3,0.4,0.5}	{0.5,0.7}	{0.4,0.6,0.7}	{0.3,0.4,0.5}	{0.7,0.8,0.9}

3.4 计算重要度评价指标权重

Step1 根据公式(7)(8)利用规范化方法得到标准化犹豫模糊评价矩阵:

$$\begin{bmatrix} \{0.2,0.3,0.4\} & \{0.7,0.9\} \\ \{0.6,0.8\} & \{0.8,0.9\} \\ \{0.5,0.7,0.8\} & \{0.5,0.7,0.8\} \\ \{0.8,0.9\} & \{0.6,0.7,0.8\} \\ \{0.3,0.4\} & \{0.9\} \\ \{0.3,0.4,0.6\} & \{0.7,0.8,0.9\} \end{bmatrix}$$

计算得到成对比较矩阵的最大特征根为:

$$\lambda_{\max} = 5.103 3$$

则一致性指标 $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = 0.025 8, RI = 1.12$ (查

表),一致性比率 $CR = \frac{CI}{RI} = 0.023 0 < 0.1$;则成对比

较矩阵通过一致性检验,可直接用来计算主观权重。

从而,计算得到主观权重:

$$w_j'' = (0.114 0, 0.472 7, 0.265 3, 0.104 4, 0.043 5)^T$$

Step5 运用 Matlab 求解得到标准化最优组合权重向量: $w_j^* = (0.194 6, 0.229 3, 0.225 3, 0.197 4, 0.153 3)^T$ 。

3.5 计算过程因素相对权重

Step1 计算得到加权犹豫模糊评价矩阵如表 13 所示。

Step2 计算得到犹豫模糊正理想解和犹豫模糊负理想解:

$$x^+ = \{H\{0.136\ 22, 0.136\ 22, 0.155\ 68\}, H\{0.137\ 58, 0.160\ 51, 0.183\ 44\}, H\{0.157\ 71, 0.157\ 71, 0.157\ 71\}, H\{0.157\ 92, 0.157\ 92, 0.177\ 66\}, H\{0.137\ 97, 0.137\ 97, 0.137\ 97\}\}$$

$$x^- = \{H\{0.019\ 46, 0.019\ 46, 0.038\ 92\}, H\{0.045\ 86, 0.045\ 86, 0.045\ 86\}, H\{0.045\ 06, 0.045\ 06, 0.067\ 59\}, H\{0.039\ 48, 0.059\ 22, 0.078\ 96\}, H\{0.076\ 65, 0.107\ 31, 0.122\ 64\}\}$$

Step3 计算得到各因素与犹豫模糊正理想解和犹豫模糊负理想解之间的距离如表 14 和表 15 所示.

表 14 各因素与犹豫模糊正理想解 x^+ 的距离

Tab.14 The distance between the factor and the hesitant fuzzy positive ideal solution x^+

$D(x_1, x^+)$	$D(x_2, x^+)$	$D(x_3, x^+)$	$D(x_4, x^+)$	$D(x_5, x^+)$	$D(x_6, x^+)$
0.385 59	0.320 38	0.246 59	0.065 82	0.199 81	0.276 87

表 15 各因素与犹豫模糊负理想解 x^- 的距离

Tab.15 The distance between the factor and the hesitant fuzzy negative ideal solution x^-

$D(x_1, x^-)$	$D(x_2, x^-)$	$D(x_3, x^-)$	$D(x_4, x^-)$	$D(x_5, x^-)$	$D(x_6, x^-)$
0.106 61	0.176 23	0.263 57	0.426 69	0.296 98	0.225 28

Step4 计算得到各因素与犹豫模糊正理想解 x^+ 的改进型相对贴近度值如表 16 所示.

表 16 各因素与犹豫模糊正理想解 x^+ 的改进型相对贴近度值

Tab.16 The modified relative closeness values of each factor to the hesitant fuzzy positive ideal solution x^+

RC(x_1)	RC(x_2)	RC(x_3)	RC(x_4)	RC(x_5)	RC(x_6)
-5.608 40	-4.454 50	-3.128 72	0	-2.339 69	-3.678 50

Step5 计算得到各因素重要度值如表 17 所示.

表 17 各因素重要度值

Tab.17 The relative weights of the six factors

人员	设备	材料	方法	环境	测量
0.038 4	0.100 0	0.170 5	0.337 3	0.212 6	0.141 2

3.6 过程因素重要度评价矩阵

结合 3.2 小节和 3.5 小节的计算结果,最终得到转台制造过程期望指数为:

$$MP = 0.474\ 6 \times 0.038\ 4 + 0.463\ 2 \times 0.1 + 0.195\ 3 \times 0.170\ 5 + 0.586\ 7 \times 0.337\ 3 + 0.352\ 0 \times 0.212\ 6 + 0.150\ 7 \times 0.141\ 2 = 0.391\ 9$$

根据制造过程期望指数等级表可知,当前转台制造过程处于一级状态,部分影响因素稍微偏离理想状态,可能会对加工质量产生一定的影响,而方法因素和环境因素作为最重要的两个方面需要进行重点监督改进,根据 3.2 小节的分析结果可知,这两个因素中主要的问题在于现场 6 s 管理的执行率与合格率较低,因此决策者可以以此为依据并结合加工结果制定相应的改进计划,从而保证下一阶段的转台制造过程.

4 结 论

本文提出了一种基于犹豫模糊集的制造过程多指标定量综合评价方法,将传统的语言化和图形化的管理方法进一步数字化,实现了对制造过程各个影响因素的定点定量把控,为决策者对制造过程的管理控制提供了一套新的评价体系,以数值化形态更直观的反映制造过程所处的状态,促进了数字化生产更全面的实施.首先,对影响制造过程的人员、设备、材料、工作方法、环境和测量这六个因素进行具体分析,并制定各因素的定量评价指标,形成了完整的制造过程多指标评价体系.其次,提出了过程因素期望指数和制造过程期望指数的概念,同时给出了相关公式和评价等级表,从而能直观的提供给决策者以定量的各因素当前状态以及制造过程当前的期望等级.再次,在对各因素对制造过程影响的重要度值进行计算时,提出了犹豫模糊熵与成对比较矩阵的最优组合赋权法来确定重要度评价的指标权重,并利用犹豫模糊 TOPSIS 模型的改进相对贴近度值来定量度量各因素的重要度值.最后,将该方法应用到某转台制造工厂,以帮助决策者定量的分析企业制造过程的状态,验证了该方法的可行性.

参考文献

[1] KIRAN D R. Total quality management: Key concepts and case studies[M]. United Kingdom: Butterworth-Heinemann, 2017: 291—311.

[2] AWASTHI A, CHAUHAN S S. A hybrid approach integrating Affinity Diagram, AHP and fuzzy TOPSIS for sustainable city logistics planning [J]. Applied Mathematical Modelling, 2012, 36(2): 573—584.

- [3] HOLTZBLATT K, BEYER H. Contextual design [M]. Second Edition. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2017: 127—146.
- [4] ZHOU S W, XIANG J W, WONG W E. Reliability analysis of dynamic fault trees with spare gates using conditional binary decision diagrams [J]. *Journal of Systems and Software*, 2020, 170: 110766.
- [5] RAHMAN S, KARANKI D R, EPINEY A, *et al.* Deterministic sampling for propagating epistemic and aleatory uncertainty in dynamic event tree analysis [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2018, 175: 62—78.
- [6] CHEN C C, WU C S, WU R C. F.E-Service enhancement priority matrix: The case of an IC foundry company [J]. *Information & Management*, 2006, 43(5): 572—586.
- [7] CHU H W, TOSIRISUK P. Process decision program chart: from operations research to total quality control [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 1991, 21(1/2/3/4): 111—115.
- [8] JAMNUCH R, VATANAWOOD W. Transforming activity network diagram with timed petri nets [C]//2019 12th International Conference on Information & Communication Technology and System (ICTS). Surabaya, Indonesia; IEEE, 2019: 125—129.
- [9] GODINA R, PIMENTEL C, SILVA F J G, *et al.* A structural literature review of the single minute exchange of die: the latest trends [J]. *Procedia Manufacturing*, 2018, 17: 783—790.
- [10] KANE V E. Process capability indices [J]. *Journal of Quality Technology*, 1986, 18(1): 41—52.
- [11] 吴一凡. 基于5M1E的飞机总装过程三维可视化及其管控方法 [D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
WU Y F. 5M1E-based 3D-visualization and monitoring of aircraft final assembly process [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019. (In Chinese)
- [12] 张根保, 彭露. “数控机床可靠性技术”专题(八)加工一致性技术 [J]. *制造技术与机床*, 2015(2): 8—14.
ZHANG G B, PENG L. Machining consistency control technology [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2015(2): 8—14. (In Chinese)
- [13] ZADEH L A. Fuzzy sets [J]. *Information and Control*, 1965, 8(3): 338—353.
- [14] TORRA V. Hesitant fuzzy sets [J]. *International Journal of Intelligent Systems*, 2010, 25(6): 529—539.
- [15] 夏梅梅. 模糊决策信息集成方式及测度研究 [D]. 南京: 东南大学, 2012: 46—55.
XIA M M. Research on fuzzy decision information aggregation techniques and measures [D]. Nanjing: Southeast University, 2012: 46—55. (In Chinese)
- [16] 王国涛, 何丽娜. 基于犹豫模糊 DEMATEL 与风险屋的供应链风险管理 [J/OL]. *计算机集成制造系统*, 2020: 1—18. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20200820.1616.002.html>.
- WANG G T, HE L N. Supply chain risk management based on hesitant fuzzy DEMATEL and house of risk [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2020: 1—18. (In Chinese)
- [17] XU Z S, XIA M M. Hesitant fuzzy entropy and cross-entropy and their use in multiattribute decision-making [J]. *International Journal of Intelligent Systems*, 2012, 27(9): 799—822.
- [18] HU J H, ZHANG X L, CHEN X H, *et al.* Hesitant fuzzy information measures and their applications in multi-criteria decision making [J]. *International Journal of Systems Science*, 2016, 47(1): 62—76.
- [19] NARAYANAMOORTHY S, GEETHA S, RAKKIYAPPAN R, *et al.* Interval-valued intuitionistic hesitant fuzzy entropy based VIKOR method for industrial robots selection [J]. *Expert Systems with Applications*, 2019, 121: 28—37.
- [20] 杜傲, 王坚, 凌卫青. 基于犹豫模糊集的机器自主及人机联合多属性决策方法 [J]. *计算机集成制造系统*, 2020, 26(8): 2099—2108.
DU A, WANG J, LING W Q. Machine autonomy and human-machine joint multi-attribute decision method based on hesitant fuzzy sets [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2020, 26(8): 2099—2108. (In Chinese)
- [21] SHAPPELL S A, WIEGMANN D A. The human factors analysis and classification system—HFACS [EB/OL]. 2000
- [22] ILLANKOON P, TRETEN P, KUMAR U. A prospective study of maintenance deviations using HFACS-ME [J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2019, 74: 102852.
- [23] QIAO W L, LIU Y, MA X X, *et al.* A methodology to evaluate human factors contributed to maritime accident by mapping fuzzy FT into ANN based on HFACS [J]. *Ocean Engineering*, 2020, 197: 106892.
- [24] 张根保, 周密. “数控机床可靠性技术”专题(十九)可靠性工程之人员因素分析与控制 [J]. *制造技术与机床*, 2016(1): 5—12.
ZHANG G B, ZHOU M. Analysis and control of human factors in reliability engineering [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2016(1): 5—12. (In Chinese)
- [25] ZARREH A, WAN H, LEE Y, *et al.* Cybersecurity concerns for total productive maintenance in smart manufacturing systems [J]. *Procedia Manufacturing*, 2019, 38: 532—539.
- [26] XU Z S, ZHANG X L. Hesitant fuzzy multi-attribute decision making based on TOPSIS with incomplete weight information [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2013, 52: 53—64.
- [27] HADI-VENCHE H A, MIRJABERI M. Fuzzy inferior ratio method for multiple attribute decision making problems [J]. *Information Sciences*, 2014, 277: 263—272.