

文章编号:1000-8055(2012)09-2075-11

基于模糊综合评价与灰色关联分析法的 多工艺方案评价

王 佩¹, 张定华¹, 陈 冰¹, 李 山¹, 马光辉²

(1. 西北工业大学 机电学院

现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 西安 710072;

2. 中国航空工业集团公司 西安航空发动机(集团)有限公司, 西安 710021)

摘 要: 为了使企业能够选择最佳的工艺方案指导实际生产, 提出了基于模糊综合评价与灰色关联分析法的多工艺方案评价方法。该方法将模糊综合评价与灰色关联分析法融合在一起建立多工艺方案评价方法。在工艺方案优选结构图中通过对影响工艺方案质量的多种影响因素进行层次化分析, 建立各影响因素的层次化模型; 在数据标准化阶段, 采用隶属度进行数据标准化操作; 在计算权重时, 在权重误差平方和最小的条件下采用主客观权重相结合的权重计算方法来代替传统灰色关联分析中的均值权重方法; 最后通过关联系数和组合权重确定工艺方案的排序。以某航空发动机叶片零件来建立实例, 结果表明: 该方法具有良好的实用效果, 满足多工艺方案优选的实际要求。

关 键 词: 多工艺方案评价; 模糊综合评价; 灰色关联分析; 权重计算; 最佳工艺方案

中图分类号: TH162

文献标志码: A

Evaluation of multi-process plans based on fuzzy comprehensive evaluation and grey relational analysis

WANG Pei¹, ZHANG Ding-hua¹, CHEN Bing¹, LI Shan¹, MA Guan-ghui²(1. Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology,
Ministry of Education, School of Mechatronics,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Xi'an Aero-Engine (Group) Company Limited,

Aviation Industry Corporation of China, Xi'an 710021, China)

Abstract: To provide evidence for enterprises to choose the best process plan, the method of multi-process plan evaluation based on fuzzy comprehensive evaluation and grey relational analysis was proposed. In this method, the fuzzy comprehensive evaluation and grey relational analysis were integrated to build a multi-process plan evaluation method. Hierarchical analysis was made in the structure figure of process plan selection process by various factors which affected the quality of process plans, and the hierarchical model of these factors was built. While standardizing data, membership degree was adopted to finish it. While calculating weight, the fuzzy comprehensive evaluation and the variation coefficient method were combined to calculate weight instead of the average weight method in the grey

收稿日期: 2011-10-29

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20120921.1251.021.html>

基金项目: 国家自然科学基金(70931004)

作者简介: 王佩(1984—), 女, 陕西渭南人, 博士生, 主要从事航空复杂薄壁零件 CAD 与质量控制方法研究。

relational analysis. Then, sorting process plans were achieved by correlation coefficients and combined weight. Finally, an aircraft engine blade was developed to illustrate the feasibility and validity of the proposed evaluation method.

Key words: multi-process plan evaluation; fuzzy comprehensive evaluation; grey relational analysis; weight computing; the best process plan

在企业实际生产加工中,一方面,由于企业有大量种类多样和能力相似的制造资源;另一方面,零件制造特征的排序、加工顺序和加工方法的非唯一性,以及多种工艺设计原则的使用导致多种不同的工艺方案。因此,根据企业的实际生产状况往往会产生多个可行工艺方案。工艺设计规划是连接零件结构设计和生产制造的重要桥梁^[1],工艺设计规划所产生的多个合理的工艺设计方案,它们是按照不同的加工质量、生产成本和生产效率等生产约束条件进行规划的,均能够使得产品合格生产,可以满足企业实际生产各种不同的生产要求。因此为了增加工艺方案的柔性,防止规划不合理造成资源分配不均衡,导致某些制造资源成为生产制造中的瓶颈,必须快速、有效地选择经济、合理的工艺方案以及提供备选的合理的工艺方案,以此增加企业生产制造的柔性、提高企业生产效率、降低企业生产成本,这对提高企业竞争力有很重要的意义。

工艺方案优选必须考虑到企业实际生产制造条件,工艺设计自身复杂性使其具有很强的经验性和不确定性。由于同一个零件加工方法和可选设备多样化,其工艺方案的制定又受到企业制造资源状态等具体生产条件的制约,因此在规划工艺方案时,应当根据不同加工方法信息和制造资源状况,对影响工艺方案的各项指标进行综合评价,以选择更加合适的方案^[2]。目前,很多学者在工艺方案的优选方法方面进行了研究,模糊技术、人工智能等已经用在工艺方案的评选方面,如层次分析法^[3-4]、神经网络^[5]、遗传算法^[6]、进化算法^[7]、粒子群算法^[8-9]、蚁群算法^[10]以及数据包络分析^[11-12]等方法,这些优选方法经常被单独用来进行方案评优,并取得了很好的效果。但是在现代机械产品生产制造过程中,多是采用多品种离散生产线,生产环境很复杂,影响因素很多,众多评价指标带有经验性、模糊性和不确定性,使得上述评价方法都有各自的优势和局限性。并且在实际生产中,由于影响工艺方案质量评价的因素很多,再加上这若干个因素之间存在着复杂和不确定性关系,各影响因素权重的确定直接影响到最终的

评估结果,如何能够合理的为各评价指标分配权重对评估结果有重要意义,而上述方法在确定权重方面考虑的因素单一,使得所确定的权重带有偏差。因此,单靠一个或几个因素指标对所选的工艺方案集进行评估并不能获得满意的结果,需要综合多个评价方法的优点,来更好地进行评估。

由于工艺设计过程是一个不确定的灰色系统,本文在综合考虑生产时间、生产成本和加工质量等各种影响因素的基础上对工艺方案的质量进行评价,采用模糊综合评价与关联分析相结合的方式,依据模糊综合评价设计两层评价结构,得到两层灰色关联分析模型。该方法首先分析影响工艺方案的各种因素,建立两层评价体系,然后采用隶属度函数进行数据标准化处理,再采用主客观综合赋权法计算权重,最后将指标的关联系数与权重相结合建立了工艺方案评价模型。

1 问题描述

理想情况下,由于零件每道工序加工方法和制造资源选择的不唯一性产生了多个工艺方案,使得在实际生产中需要对候选工艺方案的质量进行评价,选择最合适的工艺方案来指导生产,但是在实际生产中,设备可能会出现异常情况或者被其他生产任务占用,因此为了解决生产任务均衡,快速恢复生产或者解除制造设备的瓶颈等问题,需要在工艺规划时就考虑生产调度情况,提供多个可选的备选设备,实现应急情况下设备的快速替代。

为了方便讨论,进行如下假设:假定零件特征加工顺序已经确定,工艺设计原则已经确定。在该假设的前提下,零件特征的加工方法可能有多个,不同的加工方法导致不同的设备与其匹配,设备的不同导致工件走过的加工路线不同,因此产生多个候选工艺方案。如图 1 所示,在尺寸匹配、能力匹配和状态可用的条件下,可以产生多个候选工艺方案集。

假设 H 零件的候选工艺方案集为 $P = \{P_i \mid i = 1, \dots, n\}$, $A = \{A_k \mid k = 1, \dots, m\}$ 是对应的工

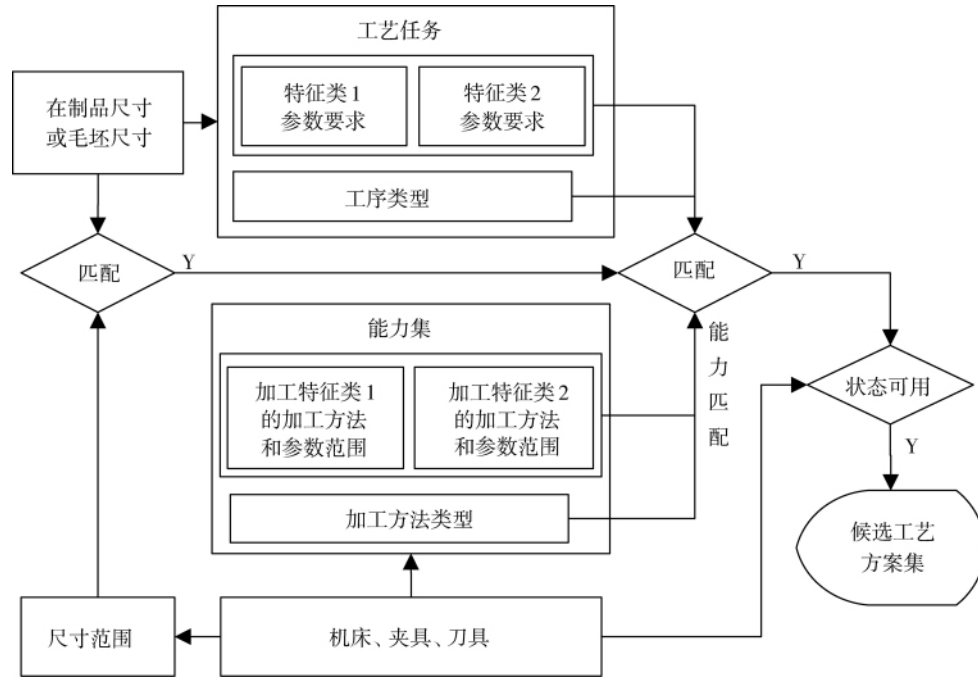


图1 工序与制造资源匹配流程

Fig. 1 Matching flow between operations and manufacturing resources

艺方案的属性集,用 $x_i(k)$ 表示候选工艺方案集 P_i 的属性 A_k ,则零件的工艺方案决策矩阵 M 可以表述如下:

$$M = [x_i(k)]_{n \times m} = \begin{bmatrix} x_1(1) & x_1(2) & \cdots & x_1(m) \\ x_2(1) & x_2(2) & \cdots & x_2(m) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_n(1) & x_n(2) & \cdots & x_n(m) \end{bmatrix}$$

2 多工艺方案评价模型的建立

在工艺设计过程中,对于同一个零件,一般可以规划出多套工艺方案,尽管它们均能达到零件设计图纸上规定的设计要求,但是由每种工艺方案所产生的实际生产成本、生产时间、加工质量却不相同,因此在进行工艺方案选择与排序时,本文提出了最优工艺方案评价原则:

1) 零件生产成本 C 最少原则. 在零件所有可选工艺方案中选择生产成本最少的那一个. 本文的生产成本由运输成本和加工成本构成,是组成工艺方案的所有工序的生产成本之和.

2) 零件生产时间 T 最短原则. 在零件所有可选的工艺方案中选择生产时间最短的那一个. 本文的生产时间由运输时间和加工时间构成,是组成工艺方案的所有工序的生产时间之和.

3) 零件加工质量 Q 最好原则. 在零件所有可选的工艺方案中选择加工质量最高的那一个. 本

文的加工质量是指以制造设备在经济加工精度为度量标准,用零件加工表面的精度等级和表面粗糙度来进行表示,零件的每道工序的精度值越小,粗糙度值越小,则最终零件加工质量最好.

经过上面3个优选条件的判断,可以选择出所有的可选设备,同时还必须考虑设备的状态是否可用,最终得到可用设备,可用设备才对零件的加工制造有意义.

由于在零件实际制造过程中,企业往往会综合考虑上述评价因素,具体评价因素在生产过程中所能达到的权重,应根据实际生产需要进行设计,将上述3个评价因素的权重分别假设为 W_1, W_2, W_3 ,且 $W_1 + W_2 + W_3 = 1$,这3个评价因素相互影响,相互制约,不同的权重设置将产生不同的工艺方案.因此,在进行工艺方案排序与优选时,必须考虑实际生产需求情况,为以上3个评价因素赋上合适权重,以满足生产实际不同的需要.

为了从众多的备选工艺方案中选择一个满足实际生产需求的最优的或尽可能的接近最优的方案,使设备选择达到最优或者尽可能接近最优,本文综合利用模糊综合评价和灰色关联度的优点,采用它们相集成的方法作为工艺优选算法进行工艺方案的评选.根据零件通用工艺模型和车间设备状况确定每个零件的有效工艺方案(即在计划时间能够实现生产的工艺方案)以形成该零件的可用工艺集,即此时任一个工艺方案都是该零件

可行的候选工艺方案. 综合考虑影响工艺方案选择的多个主要因素, 依据模糊综合评价中的层次思想建立的评价模型, 如图 2 所示, 将前文中所述的 3 个影响因素进行细化分层, 则影响工艺方案优选的因素可以被划分为两层, 第 1 层 E 为由上

述 3 个影响因素所分解的 7 个子因素构成: $E^{(1)} = \{E_1, E_2, \dots, E_7\}$, 第 2 层为与上述 7 个子因素相对应的 3 个父因素, $B^{(2)} = \{(\text{生产时间}) B_1, (\text{生产成本}) B_2, (\text{加工质量}) B_3\}$.

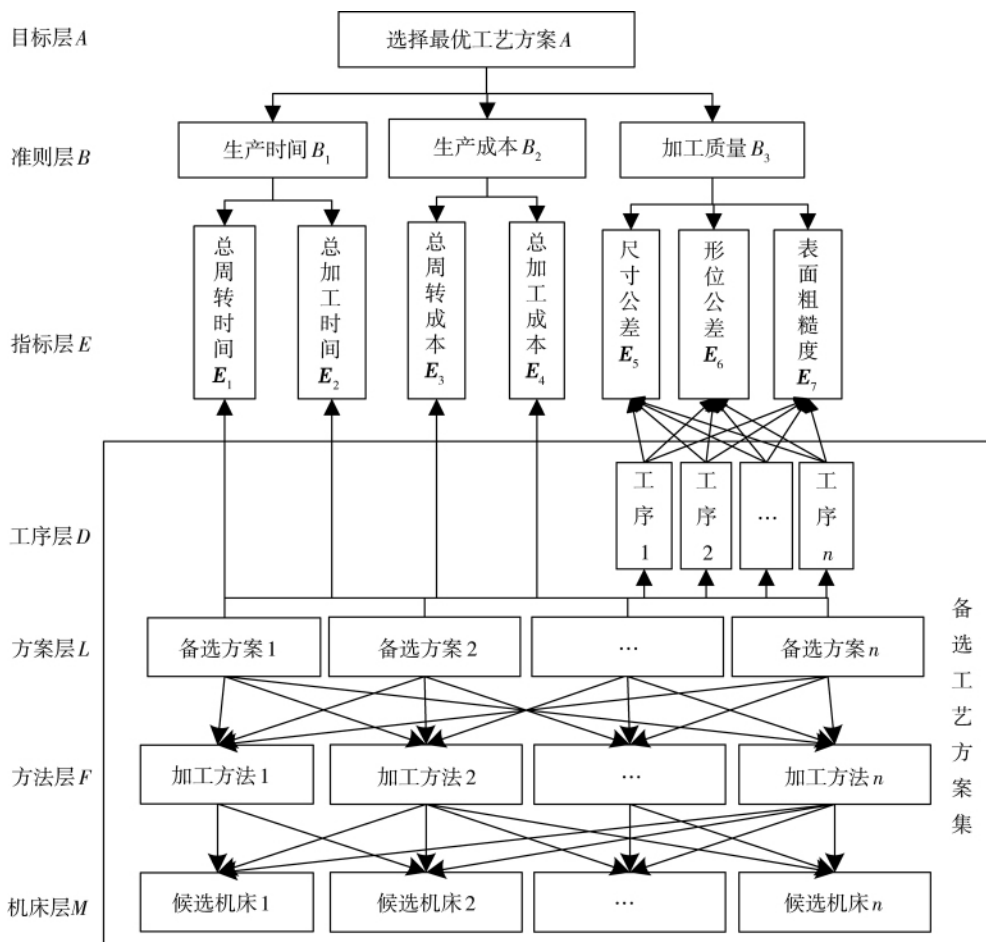


图 2 工艺方案优选层次评价模型

Fig. 2 Hierarchical evaluation model of process plan selections

3 基于模糊综合评价与灰色关联分析法的多工艺方案评价模型的求解

3.1 基于隶属度的数据标准化处理

在上述各项评价指标中, 加工质量应越高越好, 属于效益型评价指标. 生产成本应越小越好, 属于成本型评价指标^[13]. 由于评价指标包含多种类型, 通常含有多种量纲, 并且有些指标的属性值并没有直接给出定量描述, 无法直接进行它们之间的比较计算. 为了解决这种问题, 需要对各种指标的属性值进行标准化操作, 将其转换到 $[0, 1]$

内. 在不考虑其他评价指标的条件下, 评价指标中组成生产时间的周转时间和加工时间, 组成生产成本的周转成本和加工成本都是越小越好. 而加工质量中, 尺寸、形位公差和表面粗糙度均越小, 加工质量就越好. 因此这些评价指标隶属度的计算可以采用成本型计算公式, 如表 1 所示. 其中总周转时间、总加工时间、总周转成本、总加工成本表示的是一个工艺方案中的总和, 尺寸公差、形位公差、表面粗糙度表示一个工艺方案中单个工序的分量.

此时, 零件的工艺方案决策矩阵 M 转化隶属度矩阵 R , 可以表述如下:

$$R_i(k) = [x_i^*(k)]_{n \times m} = \begin{bmatrix} x_1^*(1) & x_1^*(2) & \cdots & x_1^*(m) \\ x_2^*(1) & x_2^*(2) & \cdots & x_2^*(m) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_n^*(1) & x_n^*(2) & \cdots & x_n^*(m) \end{bmatrix}$$

具体的计算如表1所示。

表1 各种指标的隶属度计算公式及变量说明

Table 1 Membership degree formulas of various indicators and variable description

公式名称	公式内容	变量说明	公式编号
总周转时间隶属度 RT_z	$\begin{cases} 0 & T_{zj} \geq T_{\max} \\ 1/\left(T_{zj} \times \sum_{k=1}^n T_{zk}^{-1}\right) & T_{zj} < T_{\max} \end{cases}$	$T_{\max}$ 表示零件的生产时间, T_{zj} 表示工艺方案 j 总的周转时间, k 表示工艺方案号, 共有 n 个方案.	(1)
总加工时间隶属度 RT_j	$\begin{cases} 0 & T_{ij} \geq T_{\max} \\ 1/\left(T_{ij} \times \sum_{k=1}^n T_{jk}^{-1}\right) & T_{ij} < T_{\max} \end{cases}$	$T_{\max}$ 表示零件的生产时间, T_{ij} 表示工艺方案 j 的总的加工时间.	(2)
总周转成本 RC_z	$\begin{cases} 0 & C_{zj} \geq C_{\max} \\ 1/\left(C_{zj} \times \sum_{k=1}^n C_{zk}^{-1}\right) & C_{zj} < C_{\max} \end{cases}$	$C_{\max}$ 表示零件任务可承受的最高生产成本, C_{zj} 表示工艺方案 j 总的周转成本.	(3)
总加工成本隶属度 RC_j	$\begin{cases} 0 & C_{ij} \geq C_{\max} \\ 1/\left(C_{ij} \times \sum_{k=1}^n C_{jk}^{-1}\right) & C_{ij} < C_{\max} \end{cases}$	$C_{\max}$ 表示零件任务可承受的最高生产成本, C_{ij} 表示工艺方案 j 总的加工成本.	(4)
尺寸公差隶属度 RP_c	$\begin{cases} 0 & P_{cij} \geq P_{\max ij} \\ 1/\left(P_{cij} \times \sum_{k=1}^n P_{cjk}^{-1}\right) & P_{cij} < P_{\max ij} \end{cases}$	$P_{\max ij}$ 表示工序 i 可接受的最大尺寸公差, P_{cij} 表示工艺方案 j 的第 i 道工序能够达到的尺寸公差.	(5)
形位公差隶属度 RP_s	$\begin{cases} 0 & P_{sij} \geq P_{\max ij} \\ 1/\left(P_{sij} \times \sum_{k=1}^n P_{sjk}^{-1}\right) & P_{sij} < P_{\max ij} \end{cases}$	$P_{\max ij}$ 表示工序 i 可接受的最大形位公差, P_{sij} 表示工艺方案 j 的第 i 道工序能够达到的形位公差.	(6)
表面粗糙度隶属度 RR_a	$\begin{cases} 0 & R_{aij} \geq R_{\max ij} \\ 1/\left(R_{aij} \times \sum_{k=1}^n R_{ajk}^{-1}\right) & R_{aij} < R_{\max ij} \end{cases}$	$R_{\max ij}$ 分别表示工序 i 可接受的最大表面粗糙度, R_{aij} 表示工艺方案 j 的第 i 道工序能够达到的表面粗糙度.	(7)

好,传统的灰色关联分析中,即使采用综合赋权的方法,在处理综合权重时采用的也是几种不同的权重系数求均值的方法,这种方法并没有使得所计算的权重与单个权重值很接近.为此本文采用误差平法和最小的方法建立如下目标函数:

3.2 各影响因素权重 W 的分配

权重分配有主观赋权和客观赋权两大类方法^[14],本文结合这两种赋权的方法,采用组合赋权法,进行权重的分配.假设有 p 种赋权方法,产生了 p 个权重 $(W_1, W_2, \dots, W_p)$, 设组合权重为 W , 应使组合权重与 $(W_1, W_2, \dots, W_p)$ 越接近越

$$\begin{cases} \min Z = \sum_{l=1}^p \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m \{[(W_l^l(k) - W_i(k))] \times x_i^*(k)\}^2 \\ \sum_{k=1}^m W_i(k) = 1 \\ W_i(k) > 0 \end{cases} \quad (8)$$

这是一个典型的带有约束条件的极值求解问题,采用拉格朗日乘子法可求得解. 构建的拉格朗日函数如下:

$$L(W_i^L, \alpha) = \sum_{L=1}^p \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m \{ [W_i(k) - W_i^L(k)] \times x_i^*(k) \}^2 - \alpha \left[\sum_{k=1}^m W_i(k) - 1 \right] \quad (9)$$

求偏导置为 0 得

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial W_i(k)} = 2 \sum_{L=1}^p \sum_{i=1}^n (W_i^L(k) - W_i(k)) \times x_i^*(k)^2 - \alpha = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \alpha} = \sum_{k=1}^m W_i(k) - 1 = 0 \end{cases} \quad (10)$$

其中 $W_i^L(k)$ 表示属性 A_k 采用第 L 种方法计算的权重, $W_i(k)$ 表示属性 A_k 的组合权重, $x_{Gi}^*(k)$ 表示标准化处理后的决策矩阵, 即对应的隶属度 $R_i(k)$. 对每一层的评价指标都采用这样的权重求解方法.

3.3 建立两层灰色关联分析法计算关联系数及关联度

依据不同的权重确定方法确定出上述各种评价指标的权值集后, 依据灰色关联分析法的基本原理, 求出各个工艺方案的各评价层对应的各种指标的关联系数. 按以下公式:

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + 0.5\Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + 0.5\Delta_{\max}} \quad (13)$$

其中

$$\begin{aligned} \Delta_{0i}(k) &= |x_0^*(k) - x_i^*(k)| \\ \Delta_{\min} &= \min_i \min_k \Delta_{0i}(k) \\ \Delta_{\max} &= \max_i \max_k \Delta_{0i}(k) \end{aligned}$$

$x_0^*(k)$ 表示决策矩阵 M^* 的每个属性值的最佳值组成的参考序列, $x_i^*(k)$ 表示的是对比序列, i 表示工艺方案, k 表示工艺方案对应的第 k 个指标.

计算出关联系数后, 需要求解关联度 γ

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n W_k \xi_i(k) \quad (14)$$

计算出各层评价指标的关联度, 根据关联度

将上式转换为矩阵表达式

$$\begin{bmatrix} 2U_1 & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ 0 & 2U_2 & \cdots & \vdots & 1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & \vdots & & 2U_m & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_m \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2S_1 \\ 2S_2 \\ \vdots \\ 2S_m \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中

$$\begin{aligned} U_k &= \sum_{i=1}^n p x_i^*(k)^2 = \sum_{i=1}^n p R_i(k)^2, \\ S_k &= \sum_{L=1}^p \sum_{i=1}^n W_i^L x_i^*(k)^2 = \sum_{L=1}^p \sum_{i=1}^n W_i^L R_i(k)^2 \end{aligned}$$

最终求得组合权重的表达式为

$$\begin{aligned} [W_1, W_2, \dots, W_m]^T &= \{ \text{diag}[2U_1, 2U_2, \dots, 2U_m] \}^{-1} \cdot \left\{ [S_1, S_2, \dots, S_m]^T + [1, 1, \dots, 1]_{1 \times m}^T \cdot \right. \\ &\quad \left. \frac{1 - [1, 1, \dots, 1]_{1 \times m} [\text{diag}[2U_1, 2U_2, \dots, 2U_m]]^{-1} [S_1, S_2, \dots, S_m]^T}{[1, 1, \dots, 1]_{1 \times m} [\text{diag}[2U_1, 2U_2, \dots, 2U_m]]^{-1} [1, 1, \dots, 1]_{1 \times m}^T} \right\} \end{aligned} \quad (12)$$

值的大小进行排序, 确定工艺方案的顺序.

4 实例验证

下面以某航空发动机制造企业 XXX 型号叶片的工艺设计过程为例来说明本文的方法. 该发动机制造企业在生产叶片方面引进了大量的先进设备, 如加工中心和五轴数控机床等, 但是这些设备使用成本、维护成本很高, 且对工人技术要求较高, 如果在叶片加工设备选择时一味的考虑这些设备会造成加工不经济、制造资源使用不平衡以及任务分配不均衡等情况, 因此, 该企业在叶片的生产加工时并不是只考虑这些先进设备, 在很多情况下, 只要满足加工要求, 普通设备也需要使用. 为此, 该企业很迫切的需要在工艺设计编制时就考虑叶片各工序加工时的各种备选设备, 按照不同的条件可以形成一个可选设备集, 包括所有的可用设备(数控类和普通类), 以应对叶片加工过程中的各种情况, 提高叶片加工的柔性. 在该企业中, 选择 XXX 型号叶片(材料 DD6)零件, 根据该企业的实际情况, 以其能力数据、该叶片的设计质量要求与客户在生产时间和生产成本方面的要求为依据, 验证本文所提方法.

该叶片一道工序所对应的制造特征可能由多种可选的加工方法完成, 而该特征对应的某种加工方法可能通过多个可选机床来实现, 因此可以

形成多个工艺方案. 由于本文篇幅所限, 只简单以该叶片零件部分工序为例进行说明.

为了便于描述本文的工艺方案评优算法, 做以下准备工作:

1) 叶片零件各个制造特征的加工顺序已经按照表 2 所示划分好^[15], 并且每道工序所能选则的主要加工方法、制造特征的精度等级和表面粗糙度也在表 2 中表示出来.

2) 表 2 所示叶片零件的每道工序的制造任务可采用表 3 所示的对应制造资源完成, 这些制造资源由多种加工方法和多台机床设备组成, 并已知对应加工机床的几何尺寸生产能力、可加工经济精度范围、运行状况以及负荷率等生产能力信息.

为了简化工艺方案优选的描述过程, 这里假设只在工序 3 中有两种可选的加工方法, 其他复杂的情况可以参照这个简化过程进行处理.

将表 2 中叶片零件的制造任务设计信息及可

采用加工方法信息与车间中制造资源制造能力信息进行匹配后, 可以得到表 3 所示的候选机床集. 表 3 中显示了机床加工对应制造任务的制造能力范围与状态信息. 由表 3 可知由于加工方法的多种选择和与加工方法相匹配的制造资源的多种选择使得该叶片零件获得多个可选工艺方案, 得到 6 条可选工艺方案(这里用工序经过的机床示意工艺方案组成)满足能力要求, 方案 1: 11-19-28-5; 方案 2: 11-19-17-5; 方案 3: 15-19-28-5; 方案 4: 15-19-17-5; 方案 5: 11-19-16-5; 方案 6: 15-19-16-5. 由表 3 可知设备 16 的负荷率过大, 为了均衡生产, 避免瓶颈设备的产生, 设备 16 不能被采用, 因此最终确定可行的工艺方案是前 4 条, 采用模糊综合评价与灰色关联分析法相集成的方法进行评价排序, 具体如下:

步骤 1 依据隶属度对各工艺方案的生产时间、生产成本和各个工序的加工质量进行数据标准化处理.

表 2 某叶片零件的工序划分与精度要求

Table 2 Divided operation and accuracy requirements of a blade

工序	制造任务	加工方法	精度等级	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$
1	粗加工榫头长侧面, 叶尖工艺台面, 粗加工榫头底面	铣削	IT10	3.2
2	粗加工叶背定位面	铣削	IT10	3.2
3	加工榫根及工艺台	线切割 铣削	IT10	3.2
4	加工工艺台定位孔	钻镗	IT9	3.2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

表 3 工序可匹配的机床的能力和状态

Table 3 Capability and status of machine tools matched with operations

工序	可选的 机床编号	可提供 加工方法	可加工 材料	工件最大直径× 最大长度	特征 尺寸	精度 IT	表面粗糙度 $R_a/\mu\text{m}$	所用设备 状态	所用设备 负荷率/%
1	11 15	铣削	单晶高温 合金 (DD6)	满足	满足	11~7 10~7	6.4~3.2 6.4~1.6	正常 正常	40 30
2	19	铣削				10~7	6.4~3.2	正常	20
3	28	线切割				12~8	6.4~3.2		
	16	铣削				9~5	6.4~0.8		
	17					10~8	6.4~1.6		
4	5	钻镗				10~6	6.4~3.2	正常	30
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

各评价指标在各工艺方案中的属性值如表 4 所示,依据表 1 中各种指标的隶属度计算公式,式(1)~式(7)这 7 个计算公式来计算每个工艺方案的生产时间隶属度、生产成本隶属度和加工质量隶属度,依次计算得到

$$R_{B_1} = \begin{pmatrix} \text{方案 1} & \text{方案 2} & \text{方案 3} & \text{方案 4} \\ T_z: 0.4545 & 0.4865 & 0.6250 & 0.3636 \\ T_j: 0.5455 & 0.5135 & 0.3750 & 0.6364 \end{pmatrix}$$

$$R_{B_2} = \begin{pmatrix} \text{方案 1} & \text{方案 2} & \text{方案 3} & \text{方案 4} \\ C_z: 0.7500 & 0.8333 & 0.8750 & 0.8654 \\ C_j: 0.2500 & 0.1667 & 0.1250 & 0.1346 \end{pmatrix}$$

$$R_{B_3} = \begin{pmatrix} \text{方案 1} & \text{方案 2} & \text{方案 3} & \text{方案 4} \\ P_c: 0.2532 & 0.2384 & 0.2642 & 0.2442 \\ P_s: 0.2639 & 0.2500 & 0.2416 & 0.2445 \\ R_a: 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 \end{pmatrix}$$

$$R_{P_c} = \begin{pmatrix} \text{方案 1} & \text{方案 2} & \text{方案 3} & \text{方案 4} \\ \text{工序 1}: 0.2628 & 0.2497 & 0.2378 & 0.2497 \\ \text{工序 2}: 0.2497 & 0.2378 & 0.2628 & 0.2497 \\ \text{工序 3}: 0.2517 & 0.2397 & 0.2797 & 0.2289 \\ \text{工序 4}: 0.2487 & 0.2262 & 0.2764 & 0.2487 \end{pmatrix}$$

$$R_{P_s} = \begin{pmatrix} \text{方案 1} & \text{方案 2} & \text{方案 3} & \text{方案 4} \\ \text{工序 1}: 0.2764 & 0.2487 & 0.2262 & 0.2487 \\ \text{工序 2}: 0.2797 & 0.2517 & 0.2397 & 0.2289 \\ \text{工序 3}: 0.2497 & 0.2497 & 0.2628 & 0.2378 \\ \text{工序 4}: 0.2497 & 0.2497 & 0.2378 & 0.2628 \end{pmatrix}$$

$$R_{R_a} = \begin{pmatrix} \text{方案 1} & \text{方案 2} & \text{方案 3} & \text{方案 4} \\ \text{工序 1}: 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 \\ \text{工序 2}: 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 \\ \text{工序 3}: 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 \\ \text{工序 4}: 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 \end{pmatrix}$$

表 4 各工艺方案评价因素指标

Table 4 Various evaluated indicators of each process plan

评价因素名称	可选工艺方案															
	工艺方案 1				工艺方案 2				工艺方案 3				工艺方案 4			
	11	19	28	5	11	19	17	5	15	19	28	5	15	19	17	5
生产 总周转时间/min		12				9.5				6				14		
时间 总加工时间/min		10				9				10				8		
生产 总周转成本/元		100				80				50				70		
成本 总加工成本/元		300				400				350				450		
各工序尺寸公差	0.019	0.020	0.021	0.020	0.020	0.021	0.019	0.020	0.020	0.021	0.018	0.022	0.020	0.022	0.018	0.020
加工 各工序形位公差	0.018	0.020	0.022	0.020	0.018	0.020	0.021	0.022	0.020	0.020	0.019	0.021	0.020	0.020	0.021	0.019
质量 各工序表面粗糙度/ μm	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2

步骤 2 依据主客观组合权重法确定各个评价因素指标的权重

主客观组合权重方法规避了主观赋权法和客观赋权法的缺点,模糊综合评价和变异系数法是这两种方法中经常采用的赋权法,本文采用它们来计算组合权重。

1) 采用模糊综合评价设置主客观权重。

设置模糊判断矩阵 A , B_1 , B_2 和 B_3 , 并计算权重

$$A = \begin{pmatrix} T_A & \text{生产时间} & \text{生产质量} & \text{加工成本} \\ \text{生产时间} & 1 & 1/2 & 2 \\ \text{生产质量} & 2 & 1 & 3 \\ \text{加工成本} & 1/2 & 1/3 & 1 \end{pmatrix}$$

$$B_1 = \begin{pmatrix} T_{B_1} & \text{总周转时间} & \text{总加工时间} \\ \text{总周转时间} & 1 & 1/2 \\ \text{总加工时间} & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

$$B_2 = \begin{pmatrix} T_{B_2} & \text{总周转成本} & \text{总加工成本} \\ \text{总周转成本} & 1 & 1/2 \\ \text{总加工成本} & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

$$B_3 =$$

$$\begin{pmatrix} T_{B_3} & \text{尺寸公差} & \text{形位公差} & \text{表面粗糙度} \\ \text{尺寸公差} & 1 & 5 & 7 \\ \text{形位公差} & 1/5 & 1 & 3 \\ \text{表面粗糙度} & 1/7 & 1/3 & 1 \end{pmatrix}$$

计算得到权重向量

$$W_A = (0.2973, 0.5390, 0.1637)^T$$

$$\lambda_{A_{\max}} = 3.00, \quad C_{AR} = 0 < 0.1$$

$$W_{B_1} = (0.1667, 0.8333)^T$$

$$W_{B_2} = (0.1667, 0.8333)^T$$

2 阶矩阵必然满足一致性要求

$$W_{B_3} = (0.7669, 0.1435, 0.0895)^T$$

$$\lambda_{B_3_{\max}} = 2.79, \quad C_{B_3R} = 0 < 0.1$$

均满足一致性检验。

2) 采用变异系数法设置客观权重

熵权法和变异系数法是客观赋权法经常采用的两种方法,在这两种方法中由于熵权法往往会导致权重均衡化,使得各个指标之间的主次不明显,为了避免这种情况,本文采用变异系数法^[16]计算客观权重,计算得到的权重值如下:

$$W_{B_1} = (0.19799, 0.80201)^T$$

$$W_{B_2} = (0.2707, 0.7293)^T$$

$$W_{B_3} = (0.5252, 0.2339, 0.2409)^T$$

然后依据模糊综合评价理论,由 $B = WR$ 计算得到的向量建立新的隶属度得到

$$R_A = \begin{pmatrix} 0.5455, 0.5135, 0.3750, 0.6364 \\ 0.2707, 0.2707, 0.2707, 0.2707 \\ 0.2532, 0.2409, 0.2642, 0.2442 \end{pmatrix}$$

由此可以计算得到

$$W_A = (0.4682, 0.2453, 0.2865)^T$$

3) 组合权重的确定

结合前两种权重计算的值,由步骤 1 计算的隶属度和式(9)~式(12)计算组合权重,得到

$$W_{B_1} = (0.1823, 0.8177)^T$$

$$W_{B_2} = (0.2187, 0.7813)^T$$

$$W_{B_3} = (0.6461, 0.1887, 0.1652)^T$$

$$W_A = (0.3828, 0.3921, 0.2251)^T$$

步骤 3 计算两层指标体系下的关联系数和关联度,确定工艺方案的优先顺序。

依据步骤 1 计算得到每个工艺方案不同指标的隶属度,以其对应属性值的最小指标,建立一个参考工艺方案,其隶属度值为: $(0.1765, 0.2293, 0.2231, 0.2087, 0.2384, 0.2416, 0.25)$,以参考工艺方案的隶属度为标准,进行各工艺方案隶属度数据归一化处理,得到表 5。

表 5 各工艺方案归一化数据

Table 5 Normalized data of each process plan

变量名称	T_z	T_j	C_z	C_j	P_c	P_s	R_a
工艺方案 1	1.9994	1.0000	1.3003	1.0000	1.0621	1.0923	1.0000
工艺方案 2	1.3331	1.1269	1.0000	1.2003	1.0000	1.0348	1.0000
工艺方案 3	1.0000	1.0000	1.0000	1.0910	1.1082	1.0000	1.0000
工艺方案 4	1.3331	1.2499	1.1820	1.5002	1.0243	1.0120	1.0000
参考工艺方案	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1	1.0000

采用式(13)根据表 5 计算第 1 层 7 个因素的关联系数

$$\zeta_{(1)1} = \begin{pmatrix} 0.3333, 0.6000, 1.0000, 0.6000 \\ 1.0000, 0.7975, 1.0000, 0.6666 \end{pmatrix}$$

$$\zeta_{(1)2} = \begin{pmatrix} 0.6246, 1.0000, 1.0000, 0.7330 \\ 1.0000, 0.7138, 0.8459, 0.4997 \end{pmatrix}$$

$$\zeta_{(1)3} = \begin{pmatrix} 0.8895, 1.0000, 0.8220, 0.9536 \\ 0.8441, 0.9349, 1.0000, 0.9765 \\ 1.0000, 1.0000, 1.0000, 1.0000 \end{pmatrix}$$

由式(14)计算得到关联度为

$$\gamma_{(1)1} = (0.8785, 0.7068, 1.0000, 0.6545)$$

$$\gamma_{(1)2} = (0.9179, 0.7764, 0.8796, 0.5507)$$

$$\gamma_{(1)3} = (0.8992, 0.9886, 0.8850, 0.9656)$$

依据模糊综合评价理论将它们组合得到第 2 层 3 个因素的关联系数矩阵

$$\zeta_A = \begin{pmatrix} 0.8785, 0.7068, 1.0000, 0.6545 \\ 0.9179, 0.7764, 0.8796, 0.5507 \\ 0.8992, 0.9886, 0.8850, 0.9656 \end{pmatrix}$$

进行关联度计算得到第 2 层关联度为

$$\gamma_A = (0.8986, 0.7975, 0.9269, 0.6838)$$

根据关联度值大小确定工艺方案最终排序为工艺方案 3 > 工艺方案 1 > 工艺方案 2 > 工艺方案 4, 采用模糊综合评价计算权重得到关联度为

$$\gamma_A = (0.8997, 0.7723, 0.8904, 0.6307)$$

得到相应工艺方案排序为

工艺方案 1 > 工艺方案 3 > 工艺方案 2 >
工艺方案 4

采用变异系数法计算权重得到关联度为

$$\gamma_A = (0.8038, 0.8862, 0.9456, 0.7219)$$

得到相应工艺方案排序为

工艺方案 3 > 工艺方案 2 > 工艺方案 1 >
工艺方案 4

由以上结果可知: 层次分析法反映了专家的主观意见, 有很大的主观性和不确定性, 变异系数法通过数据自己说话的方式来确定权重, 消除了主观影响, 但是现有的检测手段还不能使所采集的数据表现所有的信息, 没有专家的补充、意见以及各方面的权衡, 可能会导致重要属性没有得到较大的权重分配, 而本文基于权重的误差平方和最小的思想确定综合权重, 减小了主观和客观的偏差, 以权重误差最小为目标进行权重分配, 因此可以得到最优方案为工艺方案 3, 排序为

工艺方案 3 > 工艺方案 1 > 工艺方案 2 >
工艺方案 4

5 结 论

为了解决零件加工过程中多工艺方案优选问题, 提高工艺方案可执行性, 本文采用模糊综合评价和灰色关联分析相结合的方法对多工艺方案优选进行了研究. 对多工艺方案形成机理进行了分析, 建立了一种两级结构的多目标优选模型, 包括生产时间 T 、加工质量 Q 、生产成本 C 三个目标. 在此基础上, 结合模糊综合评价和灰色关联分析建立了两层多工艺方案评价模型, 该模型对工艺方案的优选进行了数学描述. 在权重选择方面采用主客观权重相结合的方式组合赋权, 避免了传统赋权方式的片面和不足. 通过实例分析研究, 表明实际情况和计算结果相吻合, 从而可以证明所建立的评价算法和模型是正确而适用的.

参考文献:

[1] 刘新华, 张旭堂, 刘文剑. 基于改进最大-最小蚂蚁系统的多工艺路线决策方法[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14

(12): 2414-2420.

LIU Xinhua, ZHANG Xutang, LIU Wenjian. Multi-process routes decision-making methodology based on improved max-min ant system[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(12): 2414-2420. (in Chinese)

[2] 程光耀, 孙厚芳, 雷贺功, 等. CAPP 多工艺方案的模糊综合评价[J]. 北京理工大学学报, 2004, 24(3): 197-200.

CHENG Guangyao, SUN Houfang, LEI Hegong, et al. Fuzzy synthetic estimation of multi-process planning schemes in CAPP[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2004, 24(3): 197-200. (in Chinese)

[3] ZHANG Jianfeng, PENG Anhua. Decision-making of slicing scheme in fused deposition modeling processes based on analytical hierarchical process[J]. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 27(2): 125-130.

[4] 陈亚哲, 刘桂珍, 刘挺, 等. 基于熵权的产品广义质量模糊综合评价[J]. 东北大学学报, 2010, 2(31): 241-244.

CHEN Yazhe, LIU Guizhen, LIU Ting, et al. Comprehensive fuzzy evaluation for generalized product quality based on entropy weight[J]. Journal of Northeastern University, 2010, 2(31): 241-244. (in Chinese)

[5] Wang M, Wang Z, Wang J. Research on ANN-based machining operation selection for rotational parts[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2010, 39(2): 470-474.

[6] Cai N, Wang L, Feng H Y. GA-based adaptive setup planning toward process planning and scheduling integration[J]. International Journal of Production Research, 2009, 47(10): 2745-2766.

[7] Li X, Gao L, Shao X, et al. Mathematical modeling and evolutionary algorithm-based approach for integrated process planning and scheduling[J]. Computers and Operations Research, 2010, 4(37): 656-667.

[8] Guo Y W, Li W D, Mileham A R, et al. Optimisation of integrated process planning and scheduling using a particle swarm optimisation approach[J]. International Journal of Production Research, 2009, 47(14): 3775-3796.

[9] 张丹, 左敦稳, 焦光明, 等. 基于粒子群遗传算法的航天产品装配顺序优化方法[J]. 兵工学报, 2010, 31(9): 1228-1234.

ZHANG Dan, ZUO Dunwen, JIAO Guangming, et al. Assembly sequence planning for aerospace products based on particle swarm optimization and genetic algorithm[J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(9): 1228-1234. (in Chinese)

[10] 田颖, 江平宇, 周光辉, 等. 基于蚁群算法的零件多工艺路线决策方法研究[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(6): 882-887.

TIAN Ying, JIANG Pingyu, ZHOU Guanghui, et al. Research on part multiple process routes decision making based on ant colony algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006, 12(6): 882-887. (in Chinese)

[11] 刘英平, 高新陵, 沈祖诒. 基于模糊数据包络分析的产品设

- 计方案评价研究[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(11): 2099-2104.
- LIU Yingping, GAO Xinling, SHEN Zuyi. Product design schemes evaluation based on fuzzy DEA[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13(11): 2099-2104. (in Chinese)
- [12] 刘英平, 林志贵, 沈祖诒. 基于改进的数据包络分析模型的绿色产品评价研究[J]. 中国机械工程, 2005, 16(20): 1809-1813.
- LIU Yingping, LIN Zhigui, SHEN Zuyi. Study on green product evaluation based on modified data envelopment analysis model[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(20): 1809-1813. (in Chinese)
- [13] 韦韞, 李东波, 焦光明, 等. 装配资源重构评价体系研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(17): 2059-2063.
- WEI Yun, LI Dongbo, JIAO Guangming, et al. Research on evaluation system for assembling resource reconfiguration [J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(17): 2059-2063. (in Chinese)
- [14] 吴坚, 梁昌勇, 李文年. 基于主观与客观集成的属性权重求解方法[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(3): 383-387.
- WU Jian, LIANG Changyong, LI Wennian. Method to determine attribute weights based on subjective and objective integrated[J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(3): 383-387. (in Chinese)
- [15] 姚倡锋, 张定华, 卜昆, 等. 异地协同资源优化配置过程模型及实现[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(3): 455-461.
- YAO Changfeng, ZHANG Dinghua, BU Kun, et al. Collaborative manufacturing resources optimization deployment process model and realization [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(3): 455-461. (in Chinese)
- [16] 门宝辉, 梁川. 基于变异系数权重的水质评价属性识别模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(10): 1373-1375.
- MEN Baohui, LIANG Chuan. Attribute recognition model based variation coefficient weight for evaluating water quality[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(10): 1373-1375. (in Chinese)