

第4章 滚磨光整加工工艺参数优选融合推理模型研究

滚磨光整加工技术已经成为改善零件和产品的使用性能、提高可靠性、延长使用寿命的重要途径之一。传统的依赖试验摸索来制定加工方案的模式过于依赖工艺技术人员经验，尤其是当前面对加工零件种类多样化和加工要求定制化的市场需求，企业在实际加工过程仅仅是满足基本的加工要求，无法充分考虑到工艺的优选。这种加工模式已经远远无法满足市场迅猛发展的需求。如何实现滚磨光整加工工艺的快速选择并进一步有实现智能化优选，对滚磨光整加工技术的应用推广具有重要的研究意义^[11]。

为了能够充分利用已经积累的大量成功的加工实例，使之能够在新工艺方案制定过程中发挥更大作用，同时借鉴光整加工领域专家丰富的知识和经验，模拟专家进行加工工艺参数确定时的推理过程。本文提出基于融合推理的滚磨光整加工工艺参数优选模型，通过加权案例推理技术与模糊专家推理技术的分级递进推理方法，实现加工工艺参数的快速优选。

4.1 工艺优选的融合推理模型总体设计

滚磨光整加工过程中，工艺的选择决定了加工能力、加工效果和加工效率这三个核心的加工要素^[112]。传统的工艺选择模式是：工艺技术专家根据被加工零件信息和加工要求，结合自己积累的加工经验，初步给出待选的滚磨光整加工工艺，再经过大量的加工试验，完成工艺方案的选择过程。由于的加工对象及加工要求逐渐呈复杂化、多批量定制化，导致试验量不断增大、高质量完成率越来越低，工艺选择过分依赖于专家经验的弊端在实际生产过程中被无限放大，极大的影响了企业的生产效率和经济效益。实际上，行业中各个加工企业已经积累了大量以传统纸质材料或电子文档为数据保存形式的成功实例，但目前最大的问题是这些海量的实例数据无法有效的应用于加工工艺的选择，造成了极大的浪费。

综上所述，影响滚磨光整加工工艺选择的因素众多、关系复杂，需要严密推理过程。具体表现为：1) 推理过程过分依赖大量工艺试验，导致效率低下；2) 专家经验无法有效积累，形成加工知识。

本章以来自不同滚磨光整加工企业和用户的生产实例为数据基础，依托已经研发的面向全产业链应用的滚磨光整加工工艺数据库平台，提出将案例推理技术与专家系统有机结合，建立滚磨光整加工工艺的融合推理优选模型。图 4-1 为工艺优选过程模型，新的加工问题提出后，首先充分利用已经积累的大量成功案例，采用加权案例推理技术（WCBR），寻找与新问题匹配的原有案例作为新问题的解；如果没有找到匹配案例，

则利用模糊专家系统（FES），匹配相似案例作为问题的解。

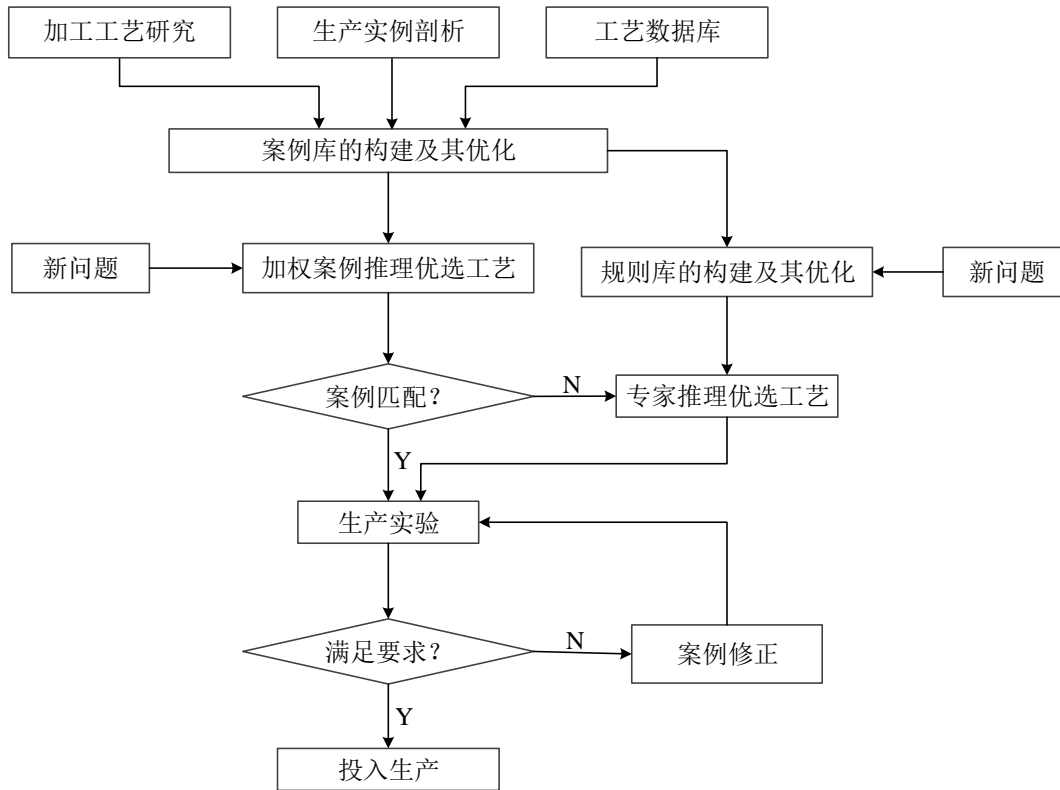


图 4-1 基于融合推理的滚磨光整加工工艺优选过程

Figure 4-1 Optimization of the barrel finishing technology based on fusion reasoning

由图 4-1 可知：通过深入研究滚磨光整加工工艺，剖析已有的大量生产实例，在本文已经构建的滚磨光整加工工艺数据库的基础上，挖掘零件特征及加工要求与加工工艺参数之间的关系，进行案例特征表示，构建滚磨光整加工工艺优选案例库，并定期进行案例库优化。面对新问题（即被加工零件及加工要求）时，首先采用基于加权案例推理技术进行滚磨光整加工工艺的优选。当新问题与案例库中的案例的相似度值 $S \geq S_{th}$ （其中 S_{th} 为相似度阈值，由专家根据实际的加工零件和加工要求，并结合已有经验给定）时，采用该案例的解（即它对应的加工工艺参数）进行生产实验。当生产实验结果满足加工要求，则投入批量生产；否则采用基于专家推理的滚磨光整加工工艺优选模型：首先根据案例库中案例特征的数据分布，建立各工艺参数的区间值优选规则，形成规则库，然后对待加工零件特征及其加工要求进行区间值模糊化表示，最后进行区间值模糊推理。即：将新问题与案例库中已有案例的各参数值之间的相似度计算，转变成了区间值模糊相似度计算，从而提高了针对新问题的加工工艺方案优选的快速性和合理性。同样，优选出的加工工艺方案也需要进行一定的生产实验，如果加工后的零件满足加工要求，则

投入批量生产，否则需要进行案例修正，再实验验证，满足加工要求后，才能实际应用。

4.2 加工工艺优选的加权案例推理模型研究

1982 年，美国耶鲁大学 Roger C. Schank 教授在《Dynamic Memory》著作中提出了以“记忆组织包（Memory Organization Packets）”为核心的“动态记忆（Dynamic Memory）”理论^[113]，这被公认为人工智能领域最早的案例推理（Case-based reasoning, CBR）的描述。其基本思想是借鉴原有相似案例的方案来解决新问题。由于 CBR 具有求解问题简单、快速和高效的优点，被广泛应用。主要步骤包括：

- 1) 将新问题进行特征表示；
- 2) 检索（Retrieve）是否存在与新问题相匹配的案例；
- 3) 如果存在匹配案例，则直接应用（Reuse）匹配案例的解；
- 4) 如果没有匹配案例，则需要对案例修正（Revise），得到新问题的解决方案；
- 5) 最后经过评价后，将满足要求的案例保存（Retain）到案例库中。

目前滚磨光整加工过程中工艺的优选过分依赖于专家经验和生产试验的现实问题，同时基于本节提出采用案例推理技术构建滚磨光整加工工艺参数的优选模型。

在案例推理技术中，进行合理的案例表示以及案例特征权重的设定至关重要，是实现高效案例推理的前提和基础。由于滚磨光整加工实际生产过程中，待加工零件类型多样，且零件的光整加工要求也各不相同，导致每一个案例特征具有不同的重要程度。也就是说，在实施案例推理时应该根据待加工对象和具体的加工要求，给案例特征赋以不同的权重，并且可以对特征权重进行动态修正。因此，提出一种基于层次分析法的加权案例推理技术，以便能够快速准确优选出合理有效的滚磨光整加工工艺。

图 4-2 为滚磨光整加工工艺优选的加权案例推理流程框图。

由图 4-2 可知，采用加权案例推理进行滚磨光整加工工艺优选的主要步骤有：

- 1) 根据待加工零件的特征描述，进行案例分级检索，确定零件的类型和材质；
- 2) 将待加工对象和具体的加工要求进行特征化表征，合成新问题；
- 3) 利用层次分析法确定各案例特征的权重；
- 4) 进行案例匹配，检索出案例库中与新问题相匹配的案例。
- 5) 若匹配到案例，则采用匹配案例对应的加工工艺方案对新零件进行加工；如果没有找到匹配案例，则进行案例修正，得到新问题的解决方案；
- 6) 采用优选出的工艺方案进行加工后，如能满足加工要求，则将该案例保存到案例库中；否则保存到废弃案例库中，以备后续分析，查找不合格原因。

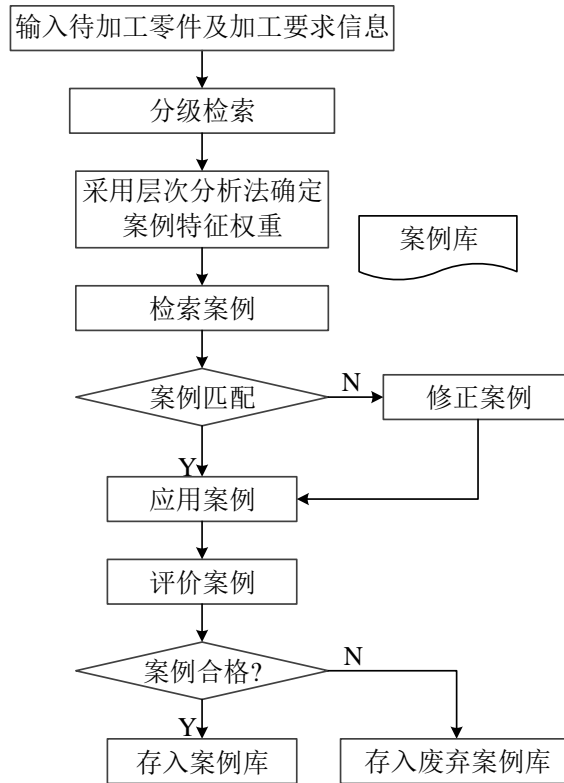


图 4-2 滚磨光整加工工艺优选的加权案例推理流程框图

Figure 4-2 The flow chart of weighted case-based reasoning on barrel finishing technology optimization

4.2.1 基于层次分析法的案例特征权重确定

在案例推理中，不同影响因素对最终优选结果的影响程度不同，这些影响因素是作为案例检索过程中的重要特征存在，所以需要对不同案例特征赋予不同的权重值，以提高案例匹配的准确率^[114,115]。因此，案例特征的权重值代表了它们的相对重要程度，通常影响越大的特征，其权重值也越大，这样可以削弱次要特征的影响。在案例检索时，案例之间的相似度主要取决于各案例特征的权重值，所以案例特征的权重就会显著影响案例推理结果的正确性^[116]，必须采用一定的方法给各案例特征赋予合理的权值。

层次分析法（Analytic Hierarchy Process，AHP）是一种定性和定量相结合的决策方法，由美国 Saaty 教授于 20 世纪 70 年代初提出的可用于层次权重决策分析的方法^[117]。因此，通过系统化、层次化分析，可以给各个案例特征赋以不同的权重值。

采用 AHP 来确定滚磨光整加工工艺案例特征权重的步骤为：

（1）搭建案例特征的层次结构模型

首先需要将待决策的问题层次化，即分为目标层、准则层、方案层等不同的层次，搭建多层结构的分析模型。通过对滚磨光整加工案例特征进行分析，根据滚磨光整加工工艺优选的案例特征之间的结构关系，经过分级检索确定零件材质和类型后，可以搭建出三层结构模型。

以轴类零件为例，图 4-3 为其案例特征层次结构模型。其中：

- 1) 目标层即为滚磨光整加工工艺方案特征；
- 2) 准则层即为影响加工工艺方案优选的零件尺寸、零件加工前的特征以及加工要求共 3 个因素；
- 3) 方案层共有 11 个因素，其中对应于轴类零件尺寸参数主要有长度和轴径共 2 个因素；对应于零件加工前的特征主要有：零件加工前的表面粗糙度、加工前的毛刺、加工前的光亮度、加工前的硬度共 4 个因素；对应于零件加工后的特征主要有：加工后放的零件表面粗糙度、加工后的毛刺、加工后的光亮度、加工后的硬度以及残余应力改善共 5 个因素。

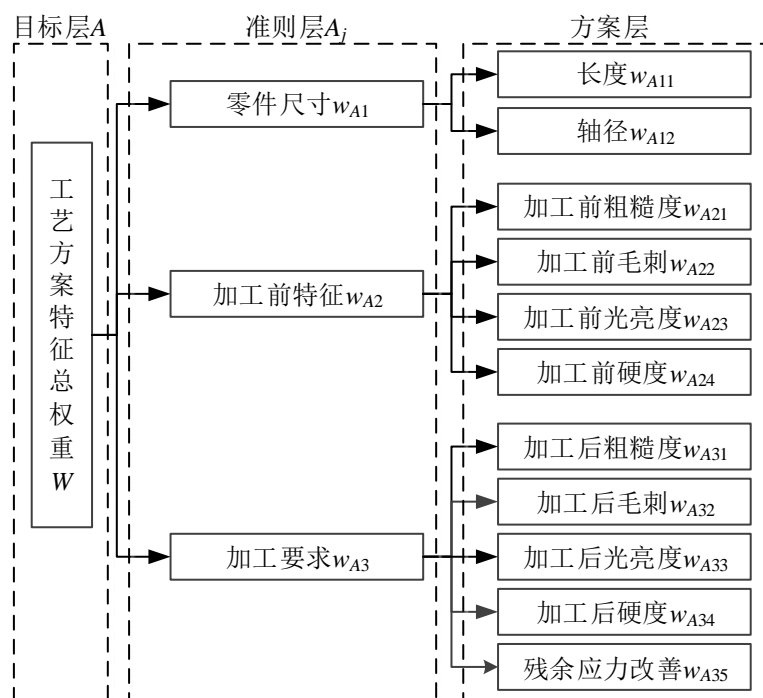


图 4-3 轴类零件的案例特征层次模型

Figure 4-3 Feature hierarchy model of shaft parts

(2) 量化各层次的比较判断矩阵

由于轴类零件的案例特征层次模型中准则层和方案层中的各指标在综合评价中的权重并不相同。采用 1~9 标度法(如表 4.1 所示)量化每个层次中的比较判断矩阵 $B = (a_{ij})_{n \times n}$ ，其中： a_{ij} 表示比较判断矩阵中指标之间的重要性之比； n 表示比较判断矩阵的阶次。

通常，各层次的比较判断矩阵需要满足是正互反判断矩阵，即：

- 1) $a_{ij} > 0$ ，即：比较判断矩阵中的各元素都大于 0；
- 2) $a_{ji} = 1/a_{ij}$ ，即：指标 i 与指标 j 之间相互比较时，它们的重要性之比互为倒数；
- 3) $a_{ii} = 1$ ，即：指标 i 相比于自身具有相同的重要性。

表 4.1 1~9 标度法的标度含义

Tab. 4.1 The scale meaning of 1~9 scale method

标度	代表的含义
1	两个指标相比, 具有同样重要
3	两个指标相比, 前者比后者稍重要
5	两个指标相比, 前者比后者重要
7	两个指标相比, 前者比后者明显重要
9	两个指标相比, 前者比后者强烈重要
2, 4, 6, 8	上述两个指标相比判断的中间值

经过对大量实际加工案例的数据进行分析研究, 同时结合滚磨光整加工领域的专家意见, 首先得到各案例特征之间的相对重要程度, 例如: 准则层中元素的重要性排序为: 加工要求、加工前特征、零件尺寸; 零件加工前特征中元素的重要性排序为: 粗糙度、硬度、毛刺、光亮度; 加工要求中元素的重要性排序为: 粗糙度、毛刺、光亮度、残余应力、硬度。然后量化各层次的比较判断矩阵, 其中: 表 4.2 为准则层判断矩阵 A , 表 4.3 为轴类零件尺寸判断矩阵 A_1 , 表 4.4 为零件加工前特征判断矩阵 A_2 , 表 4.5 为加工要求判断矩阵 A_3 。

表 4.2 准则层判断矩阵

Tab. 4.2 Criteria layer judgment matrix

A	A_1	A_2	A_3
A_1	1	1/2	1/4
A_2	2	1	1/2
A_3	4	2	1

表 4.3 轴类零件尺寸判断矩阵

Tab. 4.3 Shaft type part size judgment matrix

A_1	A_{11}	A_{12}
A_{11}	1	1/2
A_{12}	2	1

表 4.4 零件加工前特征判断矩阵

Tab. 4.4 Pre-processed feature judgment matrix

A_2	A_{21}	A_{22}	A_{23}	A_{24}
A_{21}	1	3	4	2
A_{22}	1/3	1	2	1/2
A_{23}	1/4	1/2	1	1/3
A_{24}	1/2	2	3	1

表 4.5 加工要求判断矩阵

Tab. 4.5 Processing requirement judgment matrix

A_3	A_{31}	A_{32}	A_{33}	A_{34}	A_{35}
A_{31}	1	2	3	5	4
A_{32}	1/2	1	3	4	3
A_{33}	1/3	1/3	1	3	2
A_{34}	1/5	1/4	1/3	1	1/2
A_{35}	1/4	1/3	1/2	2	1

(3) 采用几何平均法计算各层次特征的权重

采用几何平均法计算各比较判断矩阵的最大特征值以及所对应的特征向量, 可用公式 (4-1) 计算:

$$BW = \lambda_{\max} W \quad (4-1)$$

式中, B 表示各层的比较判断矩阵; λ_{\max} 表示比较判断矩阵的最大特征值; W 表示 λ_{\max} 对应的特征向量。具体步骤为:

Step 1: 计算比较判断矩阵 B 的各行各个元素的乘积:

$$m_i = \prod_{j=1}^n a_{ij}, i = 1, 2, \dots, n \quad (4-2)$$

Step 2: 计算 n 次方根:

$$\bar{w}_i = \sqrt[n]{m_i} \quad (4-3)$$

Step 3: 对向量 $\bar{W} = (\bar{w}_1, \bar{w}_2, \dots, \bar{w}_n)^T$ 进行规范化:

$$\hat{w}_i = \frac{\bar{w}_i}{\sum_{j=1}^n \bar{w}_j} \quad (4-4)$$

令矢量 $\hat{W} = (\hat{w}_1, \hat{w}_2, \dots, \hat{w}_n)^T$ 为所求的特征向量。

Step 4: 计算 B 的最大特征值 λ_{\max} , 可用公式 (4-5) 计算:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(B\hat{W})_i}{\hat{w}_i} \quad (4-5)$$

式中, $(B\hat{W})_i$ 为 $(B\hat{W})$ 的第 i 个元素。

(4) 保持判断过程的一致性检验

将 W 归一化后即可得到所求层次的各指标的单权重。为了使计算结果与实际情况相符合, 需要对 B 进行一致性检验。一致性检验就是确定所构造的判断矩阵 B 的不一致允许范围, **B 为正互反矩阵**。 B 的最大特征值 λ_{\max} 越接近 B 的阶次 n , 则表明 B 的一致

性越好；而 λ_{\max} 比 n 大的越多，则表明 B 的不一致程度越严重。这种采用最大特征值对应的特征向量表示权向量的方法，当不一致性程度严重时，会引起较大的判断误差。因此，采用 $\lambda_{\max}-n$ 的大小来表示 B 的不一致程度。

为了表征 B 的一致性程度，可以采用一致性指标（Consistency Index, CI ）指标，可用公式（4-6）计算：

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (4-6)$$

式中， n 为比较判断矩阵的阶次。

通常，当 $CI=0$ 表明 B 具有完全一致性。但是由于滚磨光整加工工艺系统是一个典型的复杂系统，与工艺优选的案例特征参数很多，使得比较判断矩阵不可能表现出完全的一致性，因此，采用平均随机一致性指标（Average Random Consistency Index，简称 RI ）进行检验。

随机构造 m 个 n 维成对比较矩阵，经计算可得 m 个一致性指标 CI_1, CI_2, \dots, CI_m ， RI 的计算公式为：

$$RI = \frac{CI_1 + CI_2 + \dots + CI_m}{m} \quad (4-7)$$

当判断矩阵的阶次 n 为 1~11 时，表 4.6 为对应的 RI 取值^[118]。

表 4.6 平均随机一致性指标
Tab. 4.6 Average random consistency index

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

在检验判断矩阵是否具有满意的一致性时，需要综合考虑矩阵的不一致程度和随机因素，因此，还需将 CI 和 RI 进行比较，得到一致性比例（Consistency Ratio, CR ），可用公式（4-8）计算：

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4-8)$$

CR 可以用来表示各判断矩阵的不一致程度。当 $CR < 0.1$ 时，表示判断矩阵 B 可以通过一致性检验；否则需要对判断矩阵进行修正。

1) 对于矩阵 A ，最大特征值为 $\lambda_{\max}=3.0000$ ，由式（4-6）计算得到： $CI=0$ ；查表 4.6 得： $RI=0.58$ ；再由式（4-8）计算得到： $CR=0$ ，其值小于 0.1，故准则层判断矩阵 A 通过了一致性检验。

准则层各指标的权重为 $W_A=[w_{A1}, w_{A2}, w_{A3}]=[0.1429, 0.2857, 0.5714]$ 。

2) 对于矩阵 A_1 ，最大特征值为 $\lambda_{\max}=2.0000$ ，由式（4-6）计算得到： $CI=0$ ；再由式

(4-8) 计算得到: $CR=0$, 其值小于 0.1, 故轴类零件尺寸判断矩阵 A_1 通过一致性检验。

方案层中轴类零件尺寸各指标的权重 $W_{A1}=[w_{A11}, w_{A12}]=[0.3335, 0.6665]$ 。

3) 对于矩阵 A_2 , 最大特征值为 $\lambda_{\max}=4.0310$, 由式 (4-6) 计算得到: $CI=0.0103$; 查表 6 得: $RI=0.90$; 再由式 (4-8) 计算得到: $CR=0.0115$, 其值小于 0.1, 故零件加工前特征判断矩阵 A_2 通过了一致性检验。

方案层中零件特征各指标的权重为 $W_{A2}=[w_{A21}, w_{A22}, w_{A23}, w_{A24}]=[0.4669, 0.1602, 0.0953, 0.2776]$ 。

4) 对于矩阵 A_3 , 最大特征值为 $\lambda_{\max}=5.1206$, 由式 (4-6) 计算得到: $CI=0.0302$; 查表 6 得: $RI=1.12$; 再由式 (4-8) 计算得到: $CR=0.0269$, 其值小于 0.1, 故加工要求判断矩阵 A_3 通过了一致性检验。

方案层中加工要求各指标的权重 $W_{A3}=[w_{A31}, w_{A32}, w_{A33}, w_{A34}, w_{A35}]=[0.4134, 0.2829, 0.1463, 0.0609, 0.0965]$ 。

(5) 计算各案例特征对目标层的总权重

方案层中各案例特征对于目标层的总权重向量 W 的计算公式为:

$$W = \{w_{A1}W_{A1}, w_{A2}W_{A2}, w_{A3}W_{A3}\} \quad (4-9)$$

式中, w_{A1} 、 w_{A2} 、 w_{A3} 分别为零件尺寸 A_1 、零件加工前特征 A_2 、加工要求 A_3 的层次单权重向量; $W_{A1}=[w_{A11}, w_{A12}]$ 为轴类零件尺寸指标 A_{11} 、 A_{12} 对于指标 A_1 的层次单权重向量; $W_{A2}=[w_{A21}, w_{A22}, w_{A23}, w_{A24}]$ 为零件加工前特征各指标 A_{21} 、 A_{22} 、 A_{23} 、 A_{24} 对于指标 A_2 的层次单权重向量; $W_{A3}=[w_{A31}, w_{A32}, w_{A33}, w_{A34}, w_{A35}]$ 为加工要求的各指标 A_{31} 、 A_{32} 、 A_{33} 、 A_{34} 、 A_{35} 对于指标 A_3 的层次单权重向量。

(6) 对工艺方案总权重进行一致性检验

如果方案层的指标对于准则层 A_j 的一致性指标为 CI_j , 对应的平均随机一致性指标为 RI_j , 则案例特征总权重的一致性指标为:

$$CR = \frac{\sum_{j=1}^3 w_{A_j} CI_j}{\sum_{j=1}^3 w_{A_j} RI_j} \quad (4-10)$$

式中, j 为第 j 个准则层指标, $j=1,2,3$ 。

根据以上计算得到的各层次的判断矩阵的 CI 和 RI , 由式 (4-10) 计算总的一致性指标 $CR=0.0225$, 其值小于 0.1, 故方案层的案例特征对于目标层的总权重通过了一致性检验。由式 (4-9) 计算各案例特征对目标层的层次总权重向量为:

$W=\{0.0477, 0.0952, 0.1334, 0.0458, 0.0272, 0.0793, 0.2362, 0.1616, 0.0836, 0.0348, 0.0551\}$ 。

由以上工艺方案优选中各案例特征权重的计算过程可知, 首先需要由滚磨光整加工

领域专家根据不同的待加工零件特征和不同的加工要求,给出合理的各层比较判断矩阵中的标度值,才能计算得到各案例特征合适的权重,最终在案例库中快速准确地检索到与新问题的匹配案例,提高优选模型的适应性。

4.2.2 案例的匹配

案例的匹配就是将计算得到的新案例与源案例库中的案例之间的相似度作为检索信息,从源案例库中检索新问题的匹配案例,然后使用检索出的案例的解能够解决新问题。因此,合理地计算相似性度是 CBR 应用的一个关键所在^[119]。

(1) 案例的分级检索的步骤

案例检索的主要步骤如下:

1) 在已研发的案例库中以零件的类型和材质进行了分类,首先根据零件类型找到对应的案例库,再通过零件材质检索出具有相同材质的案例集作为新问题的待选案例集。

2) 采用带权值的最近邻居法^[109,120,121]计算案例的相似度,可用公式(4-11)计算:

$$SIM(T, S) = \sum_{i=1}^n sim(T_i, S_i) \times w_i / \sum_{i=1}^n w_i \quad (4-11)$$

式中, $SIM(T, S)$ 为新问题 T 与案例库中的案例 S 之间的总相似度; $sim(T_i, S_i)$ 为新问题的第 i 个案例特征的值 T_i 与案例库中的第 i 个案例特征的值 S_i 之间的相似度; w_i 为采用层次分析法确定的第 i 个案例特征的权重; n 为案例特征的个数。

(2) 案例特征的相似度 $sim(T_i, S_i)$ 计算

由于滚磨光整加工试验报告中的案例描述信息的案例特征有不同的数据类型,主要有:数值型、逻辑型、二值型三种类型。因此,本文采用混合相似度算法,即不同类型案例特征,采用不同的相似度计算公式。

1) 数值型案例特征

数值型案例特征的相似度计算公式^[122,123]为:

$$sim(T_i, S_i) = \exp \left[- \left(\frac{d(T_i, S_i)}{\sqrt{2} \times \sigma_i} \right) \right] \quad (4-12)$$

$$\sigma_i = \sigma \times (i_{\max} - i_{\min}) \quad (4-13)$$

式中, $d(T_i, S_i)$ 为新问题的第 i 个案例特征 T_i 与案例库中的第 i 个案例特征 S_i 之间的绝对值距离; σ_i 为挠曲点; i_{\max} 、 i_{\min} 分别为第 i 个特征的最大值与最小值; σ 为常数,与相似度计算值及滚磨光整加工工艺优选的结果有很大的关系。通常取值范围为[0,1]。后续仿真研究其具体的取值问题。

在案例特征中,零件的尺寸、零件的硬度、零件在加工前后的表面粗糙度、零件加工前毛刺、残余应力都是数值型数据,所以采用式(4-12)和式(4-13)计算其相似度。

其中，零件加工前的毛刺可以通过仪器测量其高度 H 或毛刺厚度 B 来进行表征^[124]。

2) 逻辑型案例特征

逻辑型案例特征的相似度计算公式为^[125]：

$$\text{sim}(T_i, S_i) = 1 - \frac{|T_i - S_i|}{M} \quad (4-14)$$

式中， M 为案例特征的最大取值。

在案例特征中，零件的光亮度通常用模糊语言来进行定性分等描述。根据国家标准，光亮度属性通常分为：可辩加工痕迹方向、没有光亮度、较低且没有磨纹、光亮度非常高 4 种等级，可以用 1、2、3、4 来表示。因此，零件光亮度的相似度可以采用式（4-14）计算，且 $M=4$ 。

3) 二值型案例特征

二值型案例特征的相似度计算公式^[126]为：

$$\text{sim}(T_i, S_i) = \begin{cases} 1, & T_i = S_i \\ 0, & T_i \neq S_i \end{cases} \quad (4-15)$$

在案例特征中，通常“加工要求”即零件加工后的“毛刺”常用“有”或者“无”来描述，故采用式（4-15）计算其相似度。

4.2.3 案例处理

案例处理包含案例修正、案例应用和案例保存。根据式（4-11）计算新问题与案例库中案例间的相似度，由专家根据实际加工零件特征和加工要求，结合已有经验给定相似度阈值 S_{th} 。将相似度大于 S_{th} 的案例作为匹配案例：1) 如存在匹配案例，则应用匹配案例的工艺方案作为新零件的解决方案；2) 如没有检索到与新问题匹配的案例，则需进行案例修正。本文根据代表案例特征重要度的特征权重筛选特征参数，首先设定一个权重阈值 w_{th} ，删除小于 w_{th} 的案例特征，根据剩余的案例特征，再由式（4-11）至（4-15）计算新问题与案例库中案例的相似度，若最大的案例相似度大于 S_{th} ，则将该案例的解作为新问题的解决方案；否则采用专家推理来优选滚磨光整加工工艺参数（详见 4.3 节）。

通过案例匹配和案例修正，得到新零件的加工滚磨光整加工工艺后，需要先进行生产实验，如果实验结果满足加工要求，则投入实际生产。光整加工生产后，经过加工效果后评价，如果达到加工要求，则将该案例存入案例库中；否则存入废弃案例库，以备后续分析，查找不合格原因。随着光整加工生产的不断进行，新的案例不断保存，专家库中的知识得到积累，从而能够快速找到滚磨光整加工工艺方案。

此外本文设计了采用 WCBR 优选加工工艺的人机交互界面，可实时显示采用 WCBR 优选滚磨光整加工工艺的相关过程，包括用户根据待加工零件的类型、材质和特征，设置案例特征的比较判断矩阵参数标定值，以及各工艺参数的优选结果，详见第五章。

4.2.4 加权案例推理的仿真研究

在第二章已详细阐述了所研发的滚磨光整加工工艺数据库平台，在第三章已详细阐述了如何利用平台上的轴类、齿轮类和叶片类等大量零件的实际生产数据，分类构建了案例库，本章采用平台上的案例库进行仿真实验研究。由于篇幅所限，下面仅给出其中部分轴类零件的仿真结果。

为了深入研究 WCBR，本章根据新问题与案例库中已有案例的关系，分三种情况进行了大量的仿真研究：首先挑选了案例库中“已有的案例”作为测试案例进行仿真；然后采用与案例库中案例的“相似的案例”和“差异较大零件的案例”进行仿真，并重点讨论影响加工工艺优选结果的各因素（包括：案例特征相似度计算公式中的参数 σ 大小、相似度阈值 S_{th} 、修正阈值 w_{th} 、特征判断矩阵的确定、优化前和优化后案例库等）。

说明：在以下各表中：No.代表案例编号、M 代表材质、L 代表长度、D 代表轴径、 Ra_1 代表加工前表面粗糙度、 B_1 代表加工前毛刺、 Br_1 代表加工前光亮度、 H_1 代表加工前硬度、 Ra_2 代表加工后表面粗糙度、 B_2 代表加工后毛刺、 Br_2 代表加工后光亮度、 H_2 代表加工后硬度、Rs 代表残余应力改善；滚磨光整加工工艺参数包括：磨块、设备、磨液、加工时间。

（1）案例库中已有案例仿真

选择案例库中已有案例进行测试，以某公司已经加工成功的轴类零件（2015167-1）作为测试案例进行仿真研究，其结果如表 4.7 所示。

（2）与案例库中的案例相似的案例仿真

选择案例库中与新问题的信息相似的案例进行测试，以某公司已经加工成功的轴类零件（20110401-1）作为测试案例，仿真结果如表 4.8 所示。

当检索出的大于相似度阈值的案例数目较多且相似度也十分相近时，则可进一步由专家根据生产实际情况分析决策，选定滚磨光整加工工艺。

1) 相似度阈值 S_{th} 的仿真

相似度阈值 S_{th} 的选择对最终优选出的滚磨光整加工工艺十分重要，为合理的确定相似度阈值，进行如下仿真分析。若选择小于 0.7 的数值作为相似度阈值，优选出的滚磨光整加工工艺与待测试案例的工艺不符，不能用于新零件的加工，其仿真结果如表 4.9 所示。若选择大于 0.7 的数值作为相似度阈值，优选出的滚磨光整加工工艺与待测试案例的工艺相符，其优选结果如表 4.10 所示。

综上仿真结果，本文将相似度阈值 S_{th} 确定为 0.7。

2) 针对案例特征相似度计算公式中的参数 σ 的仿真

由于相似度计算值及滚磨光整加工工艺优选的结果与案例特征相似度计算公式中的参数 σ 的取值关系很大，所以需要进一步研究参数 σ 的设置问题。

以 0 号案例作为测试案例，列出测试案例与优选出的其它案例信息如表 4.11 所示。

表 4.7 轴类零件已有案例的仿真结果

Tab. 4.7 Simulation results of existing shaft parts cases

案例 No.	材质 M	零件尺寸		加工前特征				加工要求				相似度	加工工艺参数				
		L/mm	D/mm	Ra1/μm	B1/mm	Br1	H1/HRC	Ra2/μm	B2	Br2	H2/HRC		Rs/MP	磨块	设备	磨液	加工时间/min
2015167-1	钢	140	20	0.068	0.7	1	54	0.047	有	4	56	-256		3 号精磨	BJG-X400E	HYA	16
2015167-1	钢	140	20	0.068	0.7	1	54	0.047	有	4	56	-256	1	3 号精磨	BJG-X400E	HYA	16
2015167-2	钢	110	32	0.206	0.78	1	51	0.069	有	3	55	-230	0.942	3 号精磨	BJG-X400E	HYA	16

由表 4.7 可知，如果案例库中已有新问题的信息，则案例库中某条案例的相似度为 1，表明曾经已经加工过此类零件，并且有相同的加工要求，故可以直接将该案例中的滚磨光整加工工艺作为加工新零件的加工方案。

表 4.8 轴类零件相似案例的仿真结果

Tab. 4.8 Simulation results of similar shaft parts cases

案例 No.	材质 M	零件尺寸		加工前特征				加工要求				相似度	加工工艺参数				
		L/mm	D/mm	Ra ₁ /μm	B ₁ /mm	Br ₁	H1/HRC	Ra ₂ /μm	B ₂	Br ₂	H ₂ /HRC		Rs/MP	磨块	设备	磨液	加工时间/min
20110401-1	铸铁	245	40	1.042	0.64	1	40	0.675	无	3	48	-248		2 号中磨	X400A	HYF	40
20110401-2	铸铁	230	33	0.947	0.65	2	39	0.432	无	4	49	-247	0.905	2 号中磨	X400A	HYF	40
20110401-3	铸铁	191	24	0.996	0.95	2	39	0.662	无	4	47	-250	0.877	2 号中磨	X400A	HYF	40

由表 4.8 可知，案例库中存在有与新问题的信息相似度较高的案例，则通过比较已给出的案例相似度阈值 S_{th} ，如果存在大于阈值的相似案例，则可应用优选出的滚磨光整加工工艺作为新零件的加工方案。

表 4.9 相似度阈值 S_{th} 仿真-1

Tab. 4.9 Simulation analysis-1 of similarity threshold value S_{th}

案例 No.	材质 M	零件尺寸		加工前特征				加工要求				相似度	磨块	加工工艺参数			
		L/mm	D/mm	Ra ₁ /μm	B ₁ /mm	Br ₁	H1/HRC	Ra ₂ /μm	B ₂	Br ₂	H ₂ /HRC			Rs/MP	设备	磨液	加工时间/min
2015026-0	镍基合金	80	20	9.5	1.487	2	35	9.498	有	3	44	-189		Φ0.5	BJG-LL05	HYF	10
20110815	镍基合金	56	24	0.264	1.397	1	35	0.118	无	3	43	-190	0.649	6 号三角	BJG-LL05	HYF	8
														2 号中磨			4

表 4.10 相似度阈值 S_{th} 仿真-2

Tab. 4.10 Simulation analysis-2 of similarity threshold value S_{th}

案例 No.	材质 M	零件尺寸		加工前特征				加工要求					相似度	加工工艺参数			
		L/mm	D/mm	Ra ₁ /μm	B ₁ /mm	Br ₁	H ₁ /HRC	Ra ₂ /μm	B ₂	Br ₂	H ₂ /HRC	Rs/MP		磨块	设备	磨液	加工时间/min
20110812-1	20CrMnTiH	240	28	0.809	0.7	2	51	0.402	无	4	54	-252		3 号中磨	X400A	HYF	26
20110812-2	20CrMnTiH	228	32	1.081	0.56	2	53	0.435	无	3	56	-165	0.797	3 号中磨	X400A	HYF	26
20110812-3	20CrMnTiH	117	17	0.642	0.50	1	51	0.193	无	3	55	-191	0.719	3 号中磨	X400A	HYF	16

由表 4.10 可知，当相似度阈值选择为 0.7 时，就可以优选出符合测试零件的滚磨光整加工工艺。因此，选择相似度阈值为 0.7 是较为合适的。

表 4.11 用于研究 σ 选取范围的轴类案例信息

Tab. 4.11 Shaft case information used to study the selection of σ

案例	材质	零件尺寸		加工前特征				加工要求					加工工艺参数			
		No.	M	L/mm	D/mm	Ra ₁ /μm	B ₁ /mm	Br ₁	H ₁ /HRC	Ra ₂ /μm	B ₂	Br ₂	H ₂ /HRC	Rs/MP	磨块	设备
0	钢	395	140	1.441	1.485	1	37	1.201	无	4	49	-162	3 号精磨	W1300Z	HYA	20
1	钢	300	106	0.51	1.73	2	39	0.433	无	4	48	-154	16 目黄高铝瓷	X400B	HYA	16
2	钢	61	13	0.534	1.38	1	35	0.321	无	4	48	-145	3 号中磨	X400E	HYA	16
3	钢	118	26	0.85	1.397	1	36	0.651	无	4	45	-140	16 目黄高铝瓷	X400B	HYA	22
4	钢	395	140	1.456	1.154	2	36	1.341	无	4	46	-168	3 号精磨	W1300Z	HYA	20
5	钢	292	48	2.439	1.4	1	39	1.342	无	3	47	-156	2 号三角	BJG-X400J	HYA	20
6	钢	430	141	3.456	1.387	1	35	2.145	无	3	46	-154	Φ1.5 钢球	瀑布机	HYA	30

当 σ 值逐渐增加时, 6 个案例的相似度不断变化, 图 4-4 为案例相似度曲线变化图。

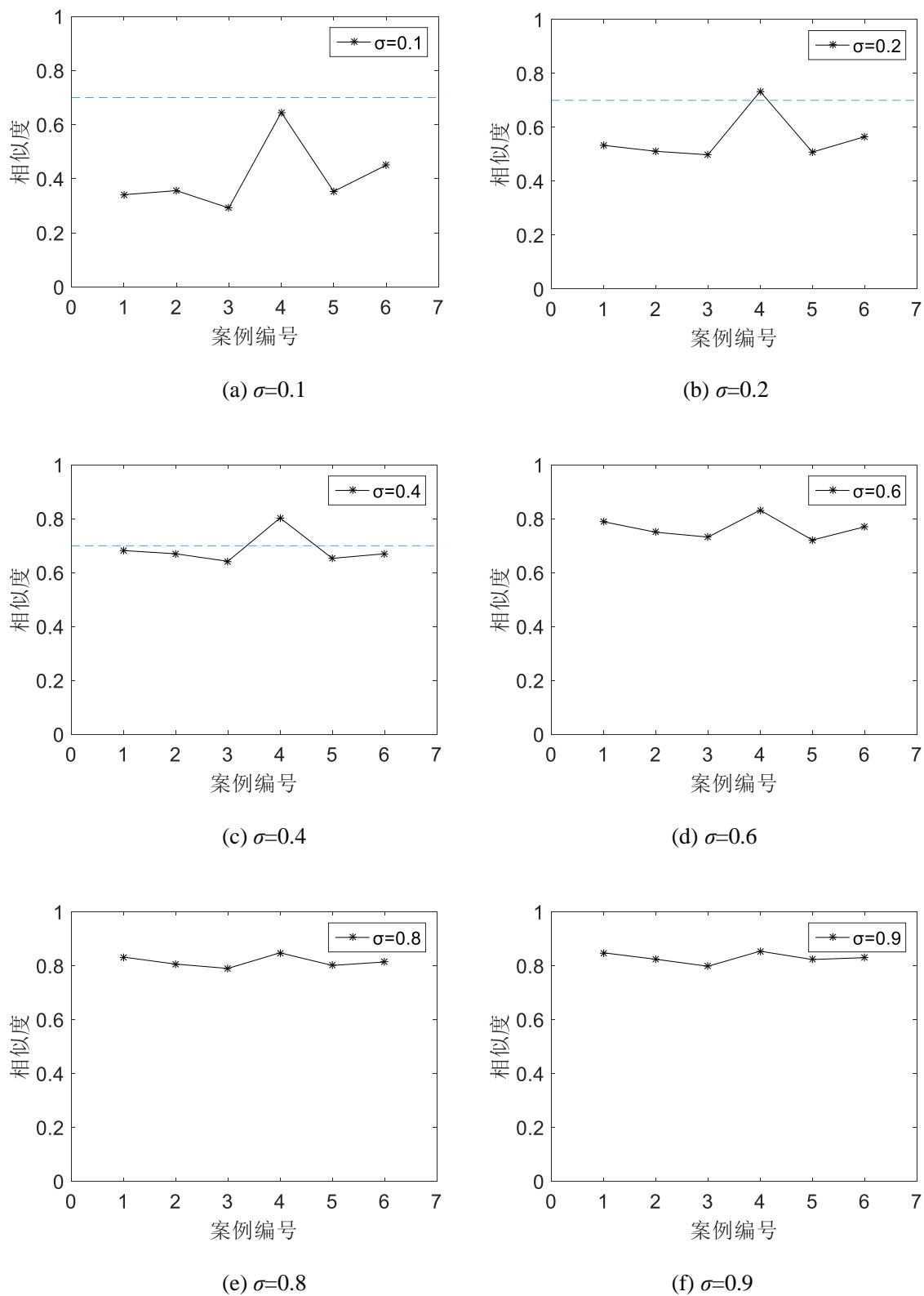


图 4-4 各案例相似度比较结果

Figure 4-4 Comparison results of similarity of cases

由图 4-4 可知, 案例的相似度值会随着参数 σ 值的增加而增加:

当 σ 值 <0.2 时, 优选出的案例相似度不满足阈值要求;

当 σ 值在 0.2 到 0.4 范围内时, 4 号案例的相似度大于相似度阈值, 并且它的加工工艺参数与测试案例的加工工艺参数相符合。而 σ 值在该范围内时该案例与其它 5 个案例间的相似度区分明显;

当 σ 值 >0.4 时, 虽然优选出的相似度第一的案例符合待加工零件的要求, 但与其它案例间的相似度差异不大, 且随着 σ 值的增大, 导致一些不符合待加工零件要求的案例的相似度也可能大于相似度阈值, 而出现错误选择。

因此, 选择 σ 值在 0.2 到 0.4 之间是较为合理的取值范围, 此范围内测试案例能够较好地找出相似的案例, 并且能区分差异大的案例, 本文在之后的仿真中将参数 σ 设置为 0.4。

(3) 差异较大的案例仿真

为了能够更合理地设定相似度阈值, 选择与案例库中与其他案例差异较大的案例作为新问题进行仿真测试。测试案例选取某企业编号为 2015004 的轴类零件案例, 其特征信息与案例库中其他案例特征信息的差异较大。仿真结果如表 4.12 所示。

输入新问题后, 由于新问题与案例库中的案例差异较大, 所以相似度均小于相似度阈值, 无法区分获取到最佳案例匹配结果。这种情况下需要进行案例修正, 为新问题寻找到合适、可用的加工工艺方案。

为了获取合理的阈值取值范围, 对表 4.12 所涉案例进行了不同阈值范围内的权重修正分析, 仿真结果如表 4.13 所示。

在修正仿真过程时, 选择不同的修正阈值 w_{th} , 得到的案例特征不同, 例如:

1) 当 w_{th} 选择在 $[0.02, 0.028]$ 范围时, 案例修正后的案例特征为长度、轴径、加工前粗糙度、加工前毛刺、加工前光亮度、加工前硬度、加工后粗糙度、加工后毛刺、加工后光亮度和加工后硬度;

2) 当 w_{th} 选择在 $[0.11, 0.12]$ 范围时, 所用案例特征只剩下加工前粗糙度、加工前毛刺、加工后粗糙度。说明越大, 则剩余的案例特征越少。随着 w_{th} 的增大, 即使相似度达到了相似度阈值要求, 但选出的工艺参数与测试案例的结果不一致, 因为案例特征太少导致优选结果错误。

3) 当案例特征权重的修正阈值 $w_{th}=[0.055, 0.10]$ 时, 可以保留对工艺优选影响更大的关键的案例特征, 从而检索出的最相似案例的相似度满足相似度阈值 0.7 的要求, 并且优选出的工艺与测试案例的工艺一致。

综上, 本文设置修正阈值 $w_{th}=0.1$, 将表 4.12 中的案例进行修正, 优选结果如表 4.14 所示。同时, 考虑部分案例还可能会出现修正后仍然达不到相似度阈值的情况, 如表 4.15 和 4.16 所示, 分别代表修正前和修正后的优选结果。

表 4.12 差异较大轴类零件案例的仿真结果

Tab. 4.12 Simulation results of shaft parts with large differences

案例 No.	材质 M	零件尺寸		加工前特征					加工要求				相似度	加工工艺参数			
		L/mm	D/mm	Ra1/ μm	B1/mm	Br1	H1/HRC	Ra2/ μm	B2	Br2	H2/HRC	Rs/MP		磨块	设备	磨液	加工时间/min
2015004	42CrMo	185	45	2.365	1.17	2	35	0.865	无	4	47	-220		3 号粗磨	X400E	HYA	10
2015171-1	42CrMo	340	57	2.846	0.85	1	43	0.851	无	3	50	-215	0.617	3 号粗磨	X400E	HYA	60
2015171-2	42CrMo	340	109	2.846	1.48	1	45	0.851	无	3	55	-220	0.605	3 号中磨	X400E	HYA	60
2016115	42CrMo	300	113	0.453	1.363	2	42	0.353	无	4	51	-216	0.481	3 号精磨	W1300Z	HYA	5
20130409-18	42CrMo	373	76	0.36	1.81	1	58	0.353	无	3	64	-272	0.273	球/圆柱混合磨料	W1600	HYA	26

表 4.13 不同修正阈值 w_{th} 的修正结果Tab. 4.13 Correction results of different modified threshold w_{th}

权重阈值区间	最相似案例编号	优选磨块	设备	磨液	加工时间/min	相似度
[0.02, 0.028]	2015171-1	3 号粗磨	X400E	HYA	60	0.682
[0.029, 0.04]	2015171-2	3 号粗磨	X400E	HYA	60	0.683
[0.045, 0.05]	2015171-3	3 号粗磨	X400E	HYA	60	0.680
[0.051, 0.054]	2015171-4	3 号粗磨	X400E	HYA	60	0.676
[0.055, 0.07]	2015171-5	3 号粗磨	X400E	HYA	60	0.721
[0.071, 0.08]	2015171-6	3 号粗磨	X400E	HYA	60	0.719
[0.085, 0.10]	2015171-7	3 号粗磨	X400E	HYA	60	0.718
[0.11, 0.12]	2015171-8	3 号中磨	X400E	HYA	60	0.728

表 4.14 轴类零件差异较大案例修正的仿真结果

Tab. 4.14 Simulation results of case correction of shaft parts with large differences

案例 No.	材质 M	零件尺寸		加工前特征				加工要求					相似度	加工工艺参数			
		L/mm	D/mm	Ra ₁ /μm	B ₁ /mm	Br ₁	H ₁ /HRC	Ra ₂ /μm	B ₂	Br ₂	H ₂ /HRC	Rs/MP		磨块	设备	磨液	加工时间/min
2015004	42CrMo	185	45	2.365	1.17	2	35	0.865	无	4	47	-220		3 号粗磨	X400E	HYA	10
2015171-7	42CrMo	340	57	2.846	0.85	1	43	0.851	无	3	50	-215	0.718	3 号粗磨	X400E	HYA	60
2015171-9	42CrMo	340	109	2.846	1.48	1	45	0.851	无	3	55	-220	0.628	3 号中磨	X400E	HYA	60
2016115	42CrMo	300	113	0.453	1.363	2	42	0.353	无	4	51	-216	0.355	3 号精磨	W1300Z	HYA	5
20130409-18	42CrMo	373	76	0.36	1.81	1	58	0.353	无	3	64	-272	0.292	球/圆柱混合磨料	W1600	HYA	26

表 4.15 特殊案例修正前优选结果

Tab. 4.15 The optimization results before the modification of special cases

案例 No.	材质 M	零件尺寸		加工前特征				加工要求					相似度	加工工艺参数			
		L/mm	D/mm	Ra ₁ /μm	B ₁ /mm	Br ₁	H ₁ /HRC	Ra ₂ /μm	B ₂	Br ₂	H ₂ /HRC	Rs/MP		磨块	设备	磨液	加工时间/min
2016132	18CrMoNi7	350	130	0.717	1.4	1	61	0.547	无	2	65	-95		2 号粗磨	X600E	钢磨液	20
2015192	18CrMoNi7	230	98	0.428	1.06	1	61	0.297	有	4	65	-120	0.370	3 号精磨	X600B	HYA	45
2016130	18CrMoNi7	170	45	0.286	1.15	1	61	0.133	有	3	65	-101	0.358	3 号中磨+3 号精磨	X400E	钢磨液	10+10
2016241-1	18CrMoNi7	746	130	0.38	1.26	1	36	0.28	有	4	40	-250	0.329	3 号中磨+3 号粗磨+3 号精磨	W1300	HYA	90+60+60
2016241-2	18CrMoNi7	702	327	0.403	0.74	2	55	0.253	有	4	57	-149	0.202	3 号精磨	W1300	HYA	120

表 4.16 特殊案例修正后优选结果

Tab. 4.16 The optimization results after the modification of special cases

案例 No.	材质 M	零件尺寸		加工前特征				加工要求					相似度	加工工艺参数			
		L/mm	D/mm	Ra ₁ /μm	B ₁ /mm	Br ₁	H ₁ /HRC	Ra ₂ /μm	B ₂	Br ₂	H ₂ /HRC	Rs/MP		磨块	设备	磨液	加工时间/min
2016132	18CrMoNi7	350	130	0.717	1.4	1	61	0.547	无	2	65	-95		2 号粗磨	BJG-	钢磨液	20
2015192	18CrMoNi7	230	98	0.428	1.06	1	61	0.297	有	4	65	-120	0.378	3 号精磨	X600B	HYA	45
2016241-1	18CrMoNi7	746	130	0.38	1.26	1	36	0.28	有	4	40	-250	0.369	3 号中磨+3 号粗磨+3 号精磨	W1300	HYA	90+60+60
2016130	18CrMoNi7	170	45	0.286	1.15	1	61	0.133	有	3	65	-101	0.361	3 号中磨+3 号精磨	X400E	钢磨液	10+10
2016241-2	18CrMoNi7	702	327	0.403	0.74	2	55	0.253	有	4	57	-149	0.205	3 号精磨	W1300	HYA	120

由表 4.14 可知, 案例修正后, 差异较大的案例进行案例匹配时, 案例相似度有所提高, 可检索到相似案例, 如 No.2015171-7 案例与测试案例的加工工艺信息一致。

由表 4.15 和 4.16 可知, 部分特殊案例修正后匹配结果相似度仍然与阈值相差较大, 无法满足要求。需采用专家推理进行优选, 详见 4.3 基于专家推理的工艺优选模型研究。

(4) 特征判断矩阵对优选结果的影响

为了讨论判断矩阵的变化对优选结果的影响, 可以通过调整判断矩阵值, 改变各层之间的重要关系, 或重要程度, 进行仿真。将原矩阵值中“加工前特征判断层”比“加工要求判断层”重要, 改为: “加工要求判断层”比“加工前特征判断层”重要, 如表 4.17; 继而改变重要的程度, 改为: “加工要求判断层”比“加工前特征层”更为重要, 如表 4.18。分别定义为“准则层判断矩阵 1”和“准则层判断矩阵 2”。同时, 在“加工前特征判断层”比“加工要求判断层”重要的前提下, 改变其重要程度, 如表 4.19 和表 4.20 所示。分别定义为“准则层判断矩阵 3”和“准则层判断矩阵 4”。基于矩阵 1 和 2 以 20110812-2 案例作为测试案例进行仿真, 结果如表 4.21 所示。基于矩阵 3 和 4 以 2015197-1 号案例作为测试案例进行仿真, 结果如表 4.22 所示。

表 4.17 准则层判断矩阵 1

Tab. 4.17 Criterion layer judgment matrix 1

A	A_1	A_2	A_3
A_1	1	1/2	1/3
A_2	2	1	1/2
A_3	3	2	1

表 4.18 准则层判断矩阵 2

Tab. 4.18 Criterion layer judgment matrix 2

A	A_1	A_2	A_3
A_1	1	1/3	1/5
A_2	3	1	1/3
A_3	5	3	1

表 4.19 准则层判断矩阵 3

Tab. 4.19 Criterion layer judgment matrix 3

A	A_1	A_2	A_3
A_1	1	1/5	1/3
A_2	5	1	2
A_3	3	1/2	1

表 4.20 准则层判断矩阵 4

Tab. 4.20 Criterion layer judgment matrix 4

A	A_1	A_2	A_3
A_1	1	1/7	1/2
A_2	7	1	5
A_3	2	1/5	1

表 4.21 判断矩阵变化前后仿真结果对比 1

Tab. 4.21 Comparison 1 of simulation results before and after the change of judgment matrix

矩阵	案例	材质	零件尺寸		加工前特征				加工要求				相似度	加工工艺参数				
矩阵	No.	M	L/mm	D/mm	Ra ₁ /μm	B ₁ /mm	Br ₁	H ₁ /HRC	Ra ₂ /μm	B ₂	Br ₂	H ₂ /HRC		Rs/MP	磨块	设备	磨液	加工时间/min
原矩阵	2011081	20CrMnTiH	228	32	1.081	0.56	2	53	0.435	无	3	56	-165		3 号中磨	X400A	HYF	26
	2011081	20CrMnTiH	117	17	0.642	0.50	1	51	0.193	无	3	55	-191	0.723	3 号中磨	X400A	HYF	16
变矩阵 1	2016172	20CrMnTiH	206	56	0.593	1.48	1	53	0.443	无	4	62	-210	0.716	2 号棕刚玉	X400B	HYF	24
变矩阵 2	2016172	20CrMnTiH	206	56	0.593	1.48	1	53	0.443	无	4	62	-210	0.732	2 号棕刚玉	X400B	HYF	24

由表 4.21 可知，当改变准则层判断矩阵，使“加工要求判断层”比“加工前特征判断层”重要时，优选出最相似案例的滚磨光整加工工艺与测试案例不符。而采用原矩阵优选出的最相似案例，满足阈值要求，且与测试案例信息相符，可用该案例工艺方案进行加工。

表 4.22 判断矩阵变化前后仿真结果对比 2

Tab. 4.22 Comparison 2 of simulation results before and after the change of judgment matrix

矩阵	案例	材质	零件尺寸		加工前特征				加工要求					相似度	加工工艺参数			
	No.	M	L/mm	D/mm	Ra ₁ /μm	B ₁ /mm	Br ₁	H ₁ /HRC	Ra ₂ /μm	B ₂	Br ₂	H ₂ /HRC	Rs/MP		磨块	设备	磨液	加工时间/min
原矩阵	2015197	合金钢	163	25	0.606	1.256	2	47	0.573	无	4	50	-158		3 号粗磨	X400J	HYA	6
	2015197	合金钢	260	90	0.918	1.078	1	48	0.582	无	4	53	-153	0.722	3 号粗磨	X400J	HYA	12
	2015177	合金钢	40	10	0.987	1.06	1	48	0.642	无	3	54	-168	0.695	16 目黄高铝	X400B	HYF	6
变矩阵 3	2016197	合金钢	260	90	0.918	1.078	1	48	0.582	无	4	53	-153	0.729	3 号粗磨	X400J	HYA	12
变矩阵 3	2016076	合金钢	278	63	0.537	0.84	1	46	0.368	无	4	52	-175	0.691	2 号粗磨	X600B	HYA	16
变矩阵 4	2015252	合金钢	410	42	0.495	1.1	2	47	0.155	有	4	55	-170	0.729	3 号斜三角	ZY600	HYA	120

由表 4.22 可知，在“加工前特征判断层”比“加工要求判断层”重要的前提下，当“加工前特征判断层”的重要程度相对“加工要求判断层”高一些时，优选出的滚磨光整加工工艺与测试案例符合，且能够将不符合加工要求的案例剔除。当“加工前特征判断层”比“加工要求判断层”重要多时，优选出的案例虽然达到阈值要求，但其加工工艺不符合测试案例要求，容易造成误选。

综上分析,特征判断矩阵会直接影响特征的权重,从而影响案例的相似度排序,甚至会导致不能检索出满足加工要求的工艺参数,因此,需要工艺专家或者具体操作的技术人员根据零件特征、零件加工前的特征、加工要求以及已有的加工经验,合理地给出各层的判断矩阵。

(5) 案例库优化对优选结果的影响

随着案例库中的案例的不断增加,案例库中可能会出现大量的冗余案例,进而影响案例推理系统的检索效率。因此,本文在第三章已重点研究了采用“改进的 FCM 算法”删除案例库中的冗余案例,在数据库中选取某一同类型轴类案例集作为测试案例库,通过算法优化后,该类型案例精简约 20%。

为了验证进行案例库优化的必要性和可行性,下面采用该轴类案例集优化后的案例库中的数据作为测试数据,并以优化前案例库中的“已有案例”、“相似案例”和“差异较大案例”三种类型的案例数据作为测试案例,重新进行仿真,具体仿真分析过程如下:

1) 案例库中已有案例仿真

以表 4.7 中的案例为测试案例,采用优化后的案例库进行仿真,仿真结果如表 4.23 所示。

2) 与案例库中的案例相似的案例仿真

以表 4.8 中的案例为测试案例,采用优化后的案例库进行仿真,仿真结果如表 4.24 所示。

① 若选择小于 0.7 的数值作为相似度阈值,以表 4.9 中的案例数据作为测试案例,仿真后优选出的滚磨光整加工工艺与待测试案例的工艺不符,其优选结果如表 4.25 所示。

② 若选择大于 0.7 的数值作为相似度阈值,以表 4.10 中的案例数据作为测试案例,仿真后优选出的滚磨光整加工工艺与待测试案例的工艺相符,其优选结果如表 4.26 所示。

3) 差异较大案例仿真

选择与案例库中某些案例差异较大的案例进行测试,以优化前表 4.12 中的案例数据作为测试案例,仿真结果如表 4.27 所示。

表 4.23 案例库中已有的轴类案例的仿真结果
Tab. 4.23 Simulation results of existing shaft parts cases

案例 No.	材质 M	零件尺寸		加工前特征				加工要求				相似度	加工工艺参数			
		L/mm	D/mm	Ra1/μm	B1/mm	Br1	H1/HRC	Ra2/μm	B2	Br2	H2/HRC		Rs/MP	磨块	设备	磨液
2015167-1	钢	140	20	0.068	0.7	1	54	0.047	有	4	56	-256	3 号精磨	BJG-X400E	HYA	16
2015167-1	钢	140	20	0.068	0.7	1	54	0.047	有	4	56	-256	1 3 号精磨	BJG-X400E	HYA	16
2015167-2	钢	110	32	0.206	0.78	1	51	0.069	有	3	55	-230	0.942 3 号精磨	BJG-X400E	HYA	16

由表 4.23 可知，如果案例库中存在新问题的信息，则其相似度为 1，可以直接将该案例的加工工艺作为新问题的解决方案。该结果与案例库优化前的优选工艺与相似度是一致的。

表 4.24 轴类相似案例的仿真结果
Tab. 4.24 Simulation result of similar shaft parts

案例 No.	材质 M	零件尺寸		加工前特征				加工要求				相似度	加工工艺参数				
		L/mm	D/mm	Ra1/μm	B1/mm	Br1	H1/HRC	Ra2/μm	B2	Br2	H2/HRC		Rs/MP	磨块	设备	磨液	加工时间/min
20110401-1	铸铁	245	40	1.042	0.64	1	40	0.675	无	3	48	-248	0.905	2 号中磨	X400A	HYF	40
20110401-2	铸铁	230	33	0.947	0.65	2	39	0.432	无	4	49	-247		2 号中磨	X400A	HYF	40
20110401-3	铸铁	191	24	0.996	0.95	2	39	0.662	无	4	47	-250		0.877	2 号中磨	X400A	HYF

由表 4.24 可知，如果案例库中存在有与新问题的信息相似度较高的案例，则通过比较已给出的案例相似度阈值 S_{th} 进行选择，如果存在大于阈值的相似案例，则可应用优选出的滚磨光整加工工艺作为新零件的加工方案。该结果与案例库优化前的优选工艺与相似度是一致的。

表 4.25 相似度阈值 S_{th} 仿真分析 1

Tab. 4.25 Simulation analysis 1 of similarity threshold value of S_{th}

案例 No.	材质 M	零件尺寸		加工前特征				加工要求					相似度	加工工艺参数			
		L/mm	D/mm	Ra ₁ /μm	B ₁ /mm	Br ₁	H ₁ /HRC	Ra ₂ /μm	B ₂	Br ₂	H ₂ /HRC	Rs/MP		磨块	设备	磨液	加工时间/min
2015026.0	镍基合金	80	20	9.5	1.487	2	35	9.498	有	3	44	-189		Φ0.5	BJG-LL05	HYF	10
20110815	镍基合金	56	24	0.264	1.397	1	35	0.118	无	3	43	-190	0.642	6 号三角+ 2 号中磨	BJG-LL05	HYF	8+4

由表 4.25 可知，所选择的案例相似度值低于 0.7，不符合测试零件加工要求。

表 4.26 相似度阈值 S_{th} 仿真分析 2

Tab. 4.26 Simulation analysis 2 of similarity threshold value of S_{th}

案例 No.	材质 M	零件尺寸		加工前特征				加工要求					相似度	加工工艺参数			
		L/mm	D/mm	Ra ₁ /μm	B ₁ /mm	Br ₁	H ₁ /HRC	Ra ₂ /μm	B ₂	Br ₂	H ₂ /HRC	Rs/MP		磨块	设备	磨液	加工时间/min
20110812-1	20CrMnTiH	240	28	0.809	0.7	2	51	0.402	无	4	54	-252		3 号中磨	X400A	HYF	26
20110812-2	20CrMnTiH	228	32	1.081	0.56	2	53	0.435	无	3	56	-165	0.799	3 号中磨	X400A	HYF	26
20110812-3	20CrMnTiH	117	17	0.642	0.50	1	51	0.193	无	3	55	-191	0.718	3 号中磨	X400A	HYF	16

由表 4.26 可知，当相似度阈值在 0.7 时，就可优选出符合测试零件加工要求的滚磨光整加工工艺。通过与案例库优化前的结果对比，其优选结果基本一致。

表 4.27 轴类差异较大零件案例的仿真结果

Tab. 4.27 Simulation results of large difference of shaft parts

案例 No.	材质 M	零件尺寸 L/mm D/mm		加工前特征 Ra1/μm B1/mm Br1 H1/HRC				加工要求 Ra2/μm B2 Br2 H2/HRC				Rs/MP	相似度	加工工艺参数			
														磨块	设备	磨液	加工时间/min
2015004	42CrMo	185	45	2.365	1.17	2	35	0.865	无	4	47	-220		3 号粗磨	X400E	HYA	10
2015171-1	42CrMo	340	57	2.846	0.85	1	43	0.851	无	3	50	-215	0.687	3 号粗磨	X400E	HYA	60
2015171-2	42CrMo	340	109	2.846	1.48	1	45	0.851	无	3	55	-220	0.615	3 号中磨	X400E	HYA	60
2016115	42CrMo	300	113	0.453	1.363	2	42	0.353	无	4	51	-216	0.481	3 号精磨	W1300Z	HYA	5
20130409-18	42CrMo	373	76	0.36	1.81	1	58	0.353	无	3	64	-272	0.273	球形/圆柱混合磨料	W1600	HYA	26

由表 4.27 可知，当新问题的信息若与案例库中所有案例信息的差异较大，则计算得到的它们的相似度较小而且数值相近，不能满足 S_{th} ，需要进行案例修正，为新问题找到可用的滚磨光整加工工艺。本文采用 $w_{th}=0.1$ ，修正结果如表 4.28 所示。

表 4.28 轴轮类差异较大案例修正的仿真结果

Tab. 4.28 Simulation results of case correction of large difference of shaft parts

案例 No.	材质 M	零件尺寸 L/mm D/mm		加工前特征 Ra1/μm B1/mm Br1 H1/HRC				加工要求 Ra2/μm B2 Br2 H2/HRC				Rs/MP	相似度	加工工艺参数			
														磨块	设备	磨液	加工时间/min
2015004	42CrMo	185	45	2.365	1.17	2	35	0.865	无	4	47	-220		3 号粗磨	X400E	HYA	10
2015171-1	42CrMo	340	57	2.846	0.85	1	43	0.851	无	3	50	-215	0.718	3 号粗磨	X400E	HYA	60
2015171-2	42CrMo	340	109	2.846	1.48	1	45	0.851	无	3	55	-220	0.627	3 号中磨	X400E	HYA	60
2016115	42CrMo	300	113	0.453	1.363	2	42	0.353	无	4	51	-216	0.355	3 号精磨	W1300Z	HYA	5
20130409-18	42CrMo	373	76	0.36	1.81	1	58	0.353	无	3	64	-272	0.292	球形/圆柱混合磨料	W1600	HYA	26

由表 4.28 可知，当新问题特征与案例库中的案例信息差异较大时，通过案例修正，可以保留对工艺优选影响更大的关键的案例特征，使案例的相似度有所提高，能够为新问题匹配到满足相似度阈值的相似案例，No.2015171-1 案例和测试案例的滚磨光整加工工艺的信息一致，可以对新零件进行加工。通过与案例库优化前的结果对比，其优选结果一致。

但对于部分案例，修正后仍达不到相似度阈值，采用表 4.15 中案例作为测试案例，其修正前后的结果对比如表 4.29 和 4.30 所示。

表 4.29 特殊案例修正前优选结果

Tab. 4.29 The optimization results before the modification of special cases

案例 No.	材质 M	零件尺寸		加工前特征				加工要求					相似度	加工工艺参数			
		L/mm	D/mm	Ra1/μm	B1/mm	Br1	H1/HRC	Ra2/μm	B2	Br2	H2/HRC	Rs/MP		磨块	设备	磨液	加工时间/min
2016132	18CrMoNi7	350	130	0.717	1.4	1	61	0.547	无	2	65	-95		2 号粗磨	X600E	钢磨液	20
2015192	18CrMoNi7	230	98	0.428	1.06	1	61	0.297	有	4	65	-120	0.370	3 号精磨	X600B	HYA	45+40
2016130	18CrMoNi7	170	45	0.286	1.15	1	61	0.133	有	3	65	-101	0.358	3 号中磨+3 号精磨	X400E	钢磨液	10+10
2016241-1	18CrMoNi7	746	130	0.38	1.26	1	36	0.28	有	4	40	-250	0.329	3 号中磨+3 号粗磨 +3 号精磨	W1300	HYA	90+60+60
2016241-2	18CrMoNi7	702	327	0.403	0.74	2	55	0.253	有	4	57	-149	0.202	3 号精磨	W1300	HYA	120

表 4.30 特殊案例修正后优选结果

Tab. 4.30 The optimization results after the modification of special cases

案例 No.	材质 M	零件尺寸		加工前特征				加工要求					相似度	加工工艺参数			
		L/mm	D/mm	Ra1/μm	B1/mm	Br1	H1/HRC	Ra2/μm	B2	Br2	H2/HRC	Rs/MP		磨块	设备	磨液	加工时间/min
2016132	18CrMoNi7	350	130	0.717	1.4	1	61	0.547	无	2	65	-95		2 号粗磨	X600E	钢磨液	20
2015192	18CrMoNi7	230	98	0.428	1.06	1	61	0.297	有	4	65	-120	0.371	3 号精磨	X600B	HYA	45+40
2016241-1	18CrMoNi7	746	130	0.38	1.26	1	36	0.28	有	4	40	-250	0.369	3 号中磨+3 号粗磨 +3 号精磨	W1300	HYA	90+60+60
2016130	18CrMoNi7	170	45	0.286	1.15	1	61	0.133	有	3	65	-101	0.341	3 号中磨+3 号精磨	X400E	钢磨液	10+10
2016241-2	18CrMoNi7	702	327	0.403	0.74	2	55	0.253	有	4	57	-149	0.190	+3 号精磨	W1300	HYA	+2h

由表 4.30 可知，对于部分特殊案例，在修正后，案例优选的相似度仍然与阈值相差较大，且优选出的滚磨光整加工工艺不符合待加工零件的要求，有一定不足。通过与案例库优化前的结果对比，在修正后，案例仍未达到相似度阈值，且相似度与优化前差异不大。

综上所述，当采用案例推理技术没有检索到合适的工艺时，需要采用模糊专家系统进行工艺优选。

因此，以“已有案例”、“相似案例”、“差异较大案例”为仿真对象，通过大量仿真分析，可知采用优化后的案例库优选出的滚磨光整加工工艺与优化前一致，且优选出的案例之间的相似度差异很小，没有明显的区别。

在优选案例正确前提下，从仿真时间角度对案例库优化前后对比分析。以表 4.23 到表 4.30 中的数据作为仿真组，与案例库优化前后的运行时间对比，结果如表 4.31 所示。

表 4.31 案例库优化前后优选时间对比结果

Tab. 4.31 Comparison of selection time before and after case base optimization

组数	1	2	3	4	5	6	7	8
优化前/s	0.100	0.186	0.105	0.063	0.089	0.105	0.125	0.129
优化后/s	0.077	0.117	0.051	0.055	0.076	0.082	0.114	0.112

图 4-5 为案例库优化前后优选时间对比图，可以更明显的观察优化前后的时间差。

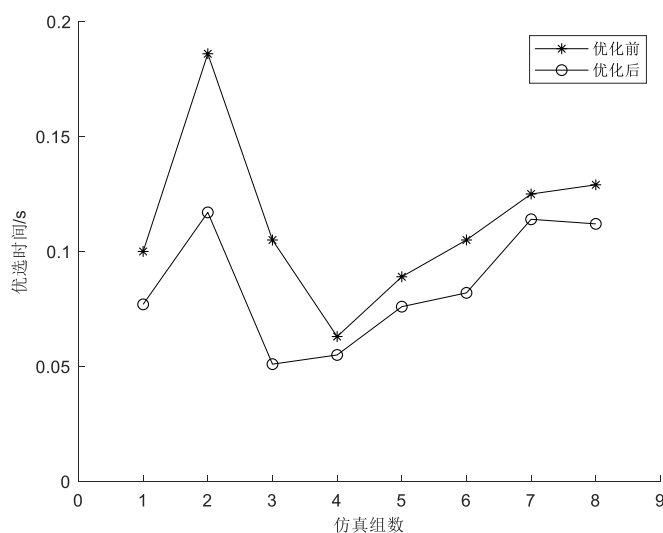


图 4-5 案例库优化前后优选时间对比图

Figure 4-5 Comparison of selection time before and after case base optimization

由图 4-5 可知，采用优化后的案例库，可以在保证优选出的加工工艺较为准确的前提下，优选的时间有一定的减少，提高了优选的速度。因此，采用 S-FCM 对案例库进行优化是必要的，也是有效的。

(6) 仿真小结

针对影响加工工艺优选结果的各因素（包括：案例特征相似度计算公式中的参数 σ 大小、相似度阈值 S_{th} 、修正阈值 w_{th} 、特征判断矩阵的确定、优化前和优化后案例库，

等), 通过数据库平台上大量的生产实例进行了仿真研究。得出: 1) 参数 σ 值的变化不影响案例相似度排序, 只影响相似度值的大小。当 $\sigma=0.4$ 时, 测试案例能够较好地找出相似的案例, 并能区分差异大的案例, 因此, 本文将参数 σ 设置为 0.4。2) 将相似度阈值 S_{th} 确定为 0.7, 可以优选出符合测试零件的滚磨光整加工工艺参数。3) 当案例特征修正阈值 w_{th} 增大到某一个值时, 尽管满足相似度阈值要求, 但优选出的加工工艺也可能不符合测试零件的要求, 本文选择 $w_{th}=0.1$ 。4) 特征判断矩阵会直接影响特征的权重, 从而影响案例的相似度排序, 甚至会导致不能检索出满足加工要求的工艺参数, 因此, 需要专家根据零件特征、零件加工前的特征、加工要求以及已有的加工经验, 合理地给出各层的判断矩阵。5) 采用优化后的案例库, 可以在保证优选出的加工工艺较为准确的前提下, 优选的时间有一定的减少, 提高了优选的速度。因此, 本文第三章提出的采用 S-FCM 对案例库进行优化是必要的, 也是有效的。

4.3 滚磨光整加工工艺优选的模糊专家推理模型研究

由 4.2 节的研究可知: 案例推理 (CBR) 是把特定领域的知识以案例的形式存储在案例库中, 通过计算新问题和旧案例之间的相似度, 从而得到新问题的解决方案。因此, 当给定新问题时, 首先通过 CBR 计算各特征值与案例库中各案例特征值之间的相似度及案例的综合加权相似度, 如果大于相似度阈值, 则将具有最高相似度的案例作为匹配案例, 它的解即可作为新问题的解。CBR 具有求解问题简单、快速和高效等优点。但是当案例库中没有与新问题匹配的案例时, CBR 需要采用案例修正, 来寻找相似案例。由 4.2.4 WCBR 的仿真研究结果可知, 针对某些与案例库中的案例差异很大的特殊案例, 在经过案例修正后, 可能仍然会找不到合适的加工工艺方案。为此, 需要研究新的理论实现针对特殊案例的加工工艺优选。本文提出采用专家推理 (Expert reasoning, ER) 来对 CBR 进行补充, ER 可以模拟专家思维进行决策, 有助于提高零件加工的智能化, 节省劳动力, 提高生产效率, 为实际生产加工提供理论指导。ER 是一种依据大量专家知识和经验来进行推理和判断的建模方法^[127], 可以把滚磨光整加工领域的专家经验和知识以规则的形式存储在知识库中, 通过计算新问题和规则之间的相似度, 从而得到滚磨光整加工中新的零件及加工要求的解决方案。

4.3.1 专家系统的基本组成

专家系统 (Expert System, ES) 是在 20 世纪 60 年代初期产生的应用科学, 随着计算机技术的发展, ES 日益完善和成熟。由于专家系统中包含了大量的领域专家的知识, 并且具有一定的类似领域专家的推理思维, 因此, 可以利用专家系统中存储的知识来解决实际问题。

常见的专家系统模型有: 基于规则的专家系统、基于案例的专家系统、基于框架的

专家系统、基于模糊逻辑的专家系统、基于 D-S 证据理论的专家系统等。其中基于规则的专家系统是一类经典的专家系统，它在早期的专家系统研究和应用中占据着重要位置，即使在专家系统快速发展的今天，也仍然是研究先进专家系统的重要基础^[128]。

虽然不同领域和不同类型的专家系统，其体系结构和功能有一定的差异，但它们的基本组成是一致的。图 4-6 为用于滚磨光整加工工艺优选的专家系统基本组成框图。

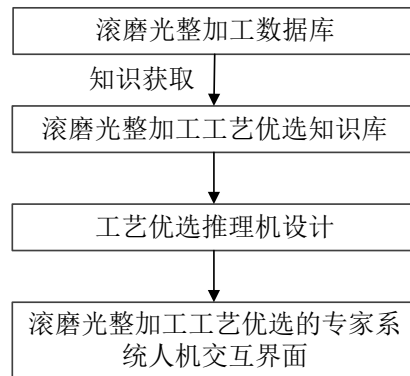


图 4-6 工艺优选的专家系统的基本组成框图

Figure 4-6 The general structure diagram of the expert system for technology selection

(1) 本论文首先在第二章详细阐述了如何把向滚磨光整领域专家获取的知识以及收集整理汇总的来自滚磨光整加工全产业链中不同的生产企业和研究院所的大量成功的生产实例，经过分析研究，构建面向全产业链的滚磨光整加工数据库的过程，并给出了最终的数据库平台，该数据库用以存放滚磨光整加工系统当前状态的事实数据、加工过程中的初始事实、中间变量以及最终结果等信息，为构建加工工艺优选的专家系统奠定了数据基础，同时该数据库平台还具有一定的自身学习完善的功能，能够不断维护和纳入新的生产数据，以维持数据库的一致性和完整性，形成了性能良好的数据库。

(2) 光整加工的知识获取：把已构建的滚磨光整加工数据库作为知识源，结合光整领域专家的经验，通过知识获取为加工工艺优选的专家系统获取知识和经验，建立起健全、完善、有效的知识库，以满足新问题求解的需要。通常，主要有三种知识获取模式，分别为：非自动知识获取、半自动知识获取及自动知识获取^[129]。图 4-7 为滚磨光整加工知识获取模式框图。

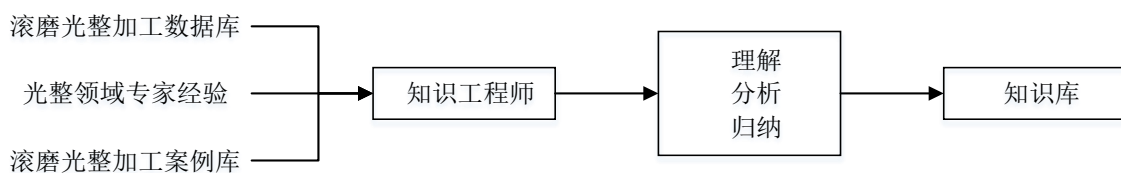


图 4-7 滚磨光整加工知识获取模式框图

Figure 4-7 Knowledge acquisition pattern diagram of the barrel finishing technology

由于滚磨光整加工机理的复杂性和光整加工环境及加工要求的不同,目前尚没有统一的滚磨加工工艺手册,本文的知识获取分两步进行:首先,本文设计的专家系统中的知识源主要来自于以滚磨光整加工产业链中各企业和研发机构的实际生产实例为基础的加工数据库平台、滚磨光整加工操作者的实际经验和该领域专家的加工经验、拥有大量成功案例的加工工艺案例库;然后通过理解、分析、归纳,把实施工艺优选的知识通过模糊区间值规则表示出来,存储到知识库当中。后期随着所研发的滚磨光整加工数据库平台功能的升级和完善,将不断纳入滚磨光整加工全产业链用户的实时的持续不断的与生产相关的数据和信息,并且引入人工智能技术,使系统逐步向自动知识获取的模式发展。

滚磨光整加工工艺优选专家系统的知识获取关键是要完成特征的选取和规则的构建。

(3) 构建工艺优选知识库:知识库是专家推理的搜索依据,无论是问题的描述、知识经验的表示或是推理决策,都离不开知识,因此,构建知识库是专家系统的中心任务之一和关键所在。基于专家系统的滚磨光整加工工艺优选知识库是专家系统进行求解问题的基础。其知识库是由大量的规则组成的。规则的含义是如果前件的前提或条件满足,则可推出后件的结论或执行后件所规定的操作。本文采用的产生式规则表示的基本形式是:IF 前件 THEN 后件。在推理过程中,根据新零件信息和知识库中的规则按照一定的推理策略进行判断、推理,从而优选出适合加工所用的滚磨光整加工工艺参数。因此,知识库中需要的是完整的知识,并且能够准确灵活地表达知识,同时还需要对知识进行合理的组织和管理,随着滚磨光整加工的持续进行,会出现大量的新的生产案例,因此必须对新案例进行检测,并删除哪些相互矛盾或者信息冗余的知识,以便保持知识的一致性,避免后续在实际推理过程中访问那些与新问题无关的知识,从而提高获取滚磨光整加工工艺的效率和准确率。

在滚磨光整加工实际应用中,由于滚磨光整加工工艺系统是一个典型的复杂系统,影响加工工艺选择的因素很多,加工工艺选择是一个多前提、多结论的推理过程,主要包括待加工零件的特征及其加工前的状态特征,因此,在选择工艺时不能只依靠某个特征值的具体的数值来选择工艺方案,例如仅依据某个粗糙度值或者确切的零件尺寸来决定选择什么样的滚磨光整加工工艺,而是根据多个特征的一定的参数范围来进行工艺选择,这样就需要把各个特征的数据进行区间值化。因此,本论文提出基于产生式规则的知识表示方法对滚磨光整加工工艺优选规则进行形式化的表示,建立区间值模糊规则,规则的前件为待加工零件的尺寸和加工前的状态参数以及用户提出的加工要求,规则的后件为滚磨光整加工的工艺参数,包括加工设备、滚抛磨块、磨液以及加工的时间等。由于待加工零件的多样性,需要按不同的零件类型分别建立规则,共同组成滚磨光整加工工艺优选的工艺知识库。

滚磨光整加工工艺专家推理优选中的知识库是通过将案例库进行特征区间模糊化来建立，并且加入专家的领域知识，知识库中的一条规则可能会包含了一个或多个案例甚至还包含了案例库中没有的案例。ER 首先将新问题模糊成一个区间，通过计算各特征区间与知识库中各规则特征区间之间的相似度及规则的综合加权相似度，将最相似的规则的结论作为新问题的解。ER 能够广泛传播和积累专家知识，为实际加工应用提供理论指导。

(4) 完成工艺优选推理机的设计：工艺优选的过程就是根据已经建立的滚磨光整加工数据库和知识库中的知识进行推理的过程，是按照一定的规则和控制策略，链接知识库中的规则和数据库中的事实，最终寻找得到新问题的解答。因此，在专家系统中推理机的设计非常重要。加工工艺优选专家系统实现的关键就是针对滚磨光整加工的特点，选取合适的推理方法，完成系统推理机的设计，实现光整加工工艺的智能优选。

(5) 滚磨光整加工工艺优选的专家系统人机交互界面：是所设计的专家系统与用户、知识工程师之间的接口，用来完成相关数据的输入和输出任务。首先是由用户通过人机界面输入欲求解的问题，包括待加工零件的特征及加工要求；然后知识工程师或专家输入专家系统所必要的参数，例如规则特征之间的比较判断矩阵以及推理参数等；结果专家推理后，可以在线实时显示系统输出经过专家系统优选出的案例的信息。总之，通过人机交互界面，不仅可以完成用户和专家或知识工程师输入信息，而且还可以回答用户的询问，更能方便实时地显示推理过程信息和最终的工艺方案优选结果。

目前国内外许多学者对专家系统展开了研究，并在应用中取得了一定的成果，专家系统被成功地应用于工业、农业、商业、医学等众多领域，所以本节提出采用专家推理实现滚磨光整加工工艺参数的优选，以提高零件加工工艺方案决策的智能化。目前关于专家规则库的构建以及推理过程与方法的研究仍是专家系统研究的难点，因此，本节将重点研究讨论光整加工工艺优选模型的规则构建以及专家推理机的设计。

4.3.2 滚磨光整加工工艺优选的专家推理模型研究

为了充分挖掘已建立的大量案例中的知识，模拟滚磨光整加工领域专家的问题描述及推理工程，提出了基于专家推理的滚磨光整加工工艺优选模型。

(1) 基于专家推理的滚磨加工工艺优选模型的技术路线

通常在设计专家系统的前期，设计人员会根据系统的需求、结构等因素对系统进行总体设计。站在全局的角度，对比分析能够实现系统需求的多种系统结构，确定最适合的系统方案，从而减少系统的开发成本，提高系统的开发质量^[130]。通过深入研究滚磨光整加工过程，结合现有的滚磨光整加工专家经验，确定滚磨光整加工专家系统的总体架构。基于专家系统的滚磨加工工艺优选模型设计，要能够通过已知被加工零件信息和加工要求，迅速地选出合适的滚磨加工工艺参数。

一般专家系统的工作过程可以描述为：系统根据用户要求输入信息，在控制策略的

指导下,运用专家知识进行逻辑推理,对原始数据进行合理的处理,选择适当的模型进行推算,对定量计算结果加以评价、调整和解释,得到最终相应的答案。并且在系统运行过程中,还可以通过案例不断总结经验,丰富系统专家知识,提高系统的实用性和可靠性^[131]。将其用于滚磨加工工艺优选中,能为实际加工提供良好的理论指导。

图 4-8 为滚磨加工工艺优选的专家推理模型的技术路线框图。

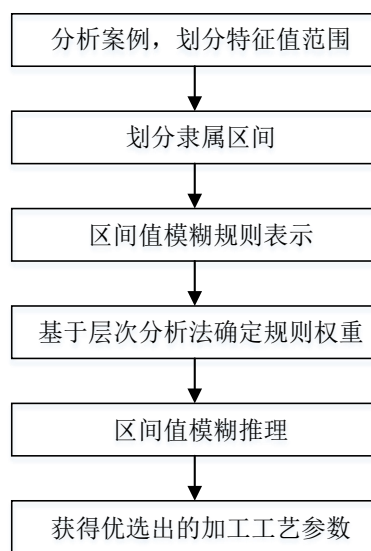


图 4-8 加工工艺优选的专家推理技术路线框图

Figure 4-8 The technical diagram of the preferred selection model of the barrel finishing technology based on expert reasoning

由图 4-8 可知,基于专家推理的滚磨加工工艺的优选流程如下:

1) 分析滚磨光整加工的实际生产案例,进行特征值范围及隶属区间划分

滚磨光整加工工艺数据库包含了大量的成功案例,每一个案例主要包含被加工零件的类型、材质、尺寸、加工前状态和加工要求,以及对应使用的滚抛磨块、加工设备、磨液和加工参数等加工工艺参数。大量分析工厂实际加工的成功案例,结合专家经验对各特征参数进行特征值范围等级划分并确定各等级对应的隶属区间。

2) 区间值模糊规则的分类分级建立

在不同零件类型下,将使用同一加工工艺进行加工的案例特征值所在的隶属区间与滚磨加工工艺之间建立联系,构建区间值模糊规则。①首先需要对生产案例依据零件类型进行一次大分类,再根据加工工艺参数进行案例的二次分类;②对使用同类加工参数的案例,依据重要的案例特征参数进行多次分级,如果按每条规则所对应的案例个数分类,可分为单个案例产生单条规则和多个案例产生单条规则两类,然后将案例与规则对应编号,将每个特征值所在范围对应的隶属区间作为规则的前提,将该案例所用的工艺

参数作为规则的结论，分别建立这两种情况下的区间值模糊规则。

3) 进行区间值模糊推理

研究滚磨光整加工工艺优选专家系统的推理机，包括特征权重确定和模糊规则推理。采用层次分析法确定特征权重。采用多重多维区间值模糊推理的方法进行滚磨光整加工专家系统的智能推理。将数据库中的被加工零件信息与知识库中的规则前件特征的隶属区间进行相似度计算，根据阈值大小判断被激活的规则，并进行推理结果的计算，将知识库与数据库中的信息有效衔接起来。

(2) 滚磨光整加工工艺优选规则特征值范围及隶属区间确定

为了构建滚磨光整加工工艺优选工艺知识库，需要对规则前件的每个特征的特征值范围及隶属区间进行划分，便于对规则进行规范的形式化表示。在滚磨光整加工应用中，一个特征的隶属度往往不易确定，而区间值隶属度相对而言较易确定。在滚磨光整加工应用中，建立区间值模糊规则，首先需要大量分析已有案例中的特征参数值，结合专家经验对各特征参数进行特征值范围等级划分并确定各等级对应的隶属区间。

以轴类零件为例，根据上述建立的案例特征可知，轴类零件的规则特征主要有：长度(L)、轴径(D)、粗糙度(Ra)、加工前毛刺(B₁)、光亮度(Br)、硬度(H)、残余应力改善(Rs)、加工后毛刺(B₂)。在构建好的规则特征基础上，通过对案例库中各案例的特征属性值进行分析归纳，每个特征对应的不同等级、特征值范围和隶属区间划分如下：

1) 轴类零件长度分为：小 ($L \leq 100\text{mm}$)、较小 ($100\text{mm} < L \leq 300\text{mm}$)、较大 ($300\text{mm} < L \leq 500\text{mm}$)、大 ($L > 500\text{mm}$)；

2) 轴类零件轴径分为：小 ($D \leq 40\text{mm}$)、较小 ($40\text{mm} < D \leq 80\text{mm}$)、较大 ($80\text{mm} < D \leq 120\text{mm}$)、大 ($D > 120\text{mm}$)；

3) 表面粗糙度等级分为：高 ($Ra \leq 0.2\mu\text{m}$)、较高 ($0.2\mu\text{m} < Ra \leq 0.4\mu\text{m}$)、较低 ($0.4\mu\text{m} < Ra \leq 0.8\mu\text{m}$)、低 ($Ra > 0.8\mu\text{m}$)；

4) 毛刺高度等级分为：小 ($B_1 \leq 0.5\text{mm}$)、较小 ($0.5\text{mm} < B_1 \leq 1\text{mm}$)、较大 ($1\text{mm} < B_1 \leq 1.5\text{mm}$)、大 ($B_1 > 1.5\text{mm}$)；

5) 光亮度要求根据国家标准，光亮度属性有可辨加工痕迹方向、没有光亮度、光亮度较低且没有磨纹、光亮度非常高四种等级；

6) 硬度等级分为：小 ($H \leq 40\text{HRC}$)、较小 ($40\text{HRC} < H \leq 50\text{HRC}$)、较大 ($50\text{HRC} < H \leq 60\text{HRC}$)、大 ($H > 60\text{HRC}$)；

7) 残余应力改善等级分为：小 ($R_s \geq -100\text{MP}$)、较小 ($-200\text{MP} \leq R_s < -100\text{MP}$)、较大 ($-300\text{MP} \leq R_s < -200\text{MP}$)、大 ($R_s < -300\text{MP}$)；

8) 加工后毛刺分为：有和无。

在划分好各特征参数值的等级范围后，还需要对各特征属性的隶属区间在[0,1]上按

对应等级进行划分, 数值越大, 等级越高。例如将加工前粗糙度等级划分为 1, 2, 3, 4 共四级, 对应的隶属区间分为: 低 $[0,0.25]$ 、较低 $[0.25,0.5]$ 、较高 $[0.5,0.75]$ 、高 $[0.75,1]$, 如表 4.32 所示。

表 4.32 粗糙度对应的不同等级、特征值范围和隶属区间

Tab. 4.32 The grad、range of characteristic value and the interval membership degree of roughness

粗糙度 Ra	低 (1)	较低 (2)	较高 (3)	高 (4)
粗糙度区间值化/ μm	$Ra \leq 0.2$	$0.2 < Ra \leq 0.4$	$0.4 < Ra \leq 0.8$	$Ra > 0.8$
粗糙度隶属区间	$[0,0.25]$	$(0.25,0.5]$	$[0.5,0.75]$	$[0.75,1]$

其它各规则特征划分依据与表面粗糙度划分依据相似, 轴类零件各特征区间值范围及隶属区间划分如表 4.33 所示。

表 4.33 轴类零件特征值范围及隶属区间

Tab. 4.33 The range of characteristic value and the interval membership degree of shaft parts

特征	特征区间值范围及隶属区间			
长度 L/mm	小 (1) $L \leq 100[0,0.25]$	较小 (2) $100 < L \leq 300, [0.25,0.5]$	较大 (3) $300 < L \leq 500, [0.5,0.75]$	大 (4) $L > 500, [0.75,1]$
轴径 D/mm	小 (1) $D \leq 40[0,0.25]$	较小 (2) $40 < D \leq 80, [0.25,0.5]$	较大 (3) $80 < D \leq 120, [0.5,0.75]$	大 (4) $D > 120, [0.75,1]$
粗糙度 Ra/ μm	低 (1) $Ra \leq 0.2[0,0.25]$	较低 (2) $0.2 < Ra \leq 0.4, [0.25,0.5]$	较高 (3) $0.4 < Ra \leq 0.8, [0.5,0.75]$	高 (4) $Ra > 0.8, [0.75,1]$
毛刺 B ₁ /mm	小 (1) $B_1 \leq 0.5[0,0.25]$	较小 (2) $0.5 < B_1 \leq 1, [0.25,0.5]$	较大 (3) $1 < B_1 \leq 1.5, [0.5,0.75]$	大 (4) $B_1 > 1.5, [0.75,1]$
光亮度 Br	可辨加工痕迹方向 (1)	无光亮度 (2) $[0.25,0.5]$	较低且没有磨纹 (3) $[0.5,0.75]$	光亮度非常高 (4) $[0.75,1]$
硬度 H/HRC	小 (1) $H \leq 40[0,0.25]$	较小 (2) $40 < H \leq 50, [0.25,0.5]$	较大 (3) $50 < H \leq 60, [0.5,0.75]$	大 (4) $D > 60, [0.75,1]$
残余应力改善 Rs/MP	小 (1) $Rs \geq -100[0,0.25]$	较小 (2) $-200 \leq Rs < -100, [0.25,0.5]$	较大 (3) $-300 \leq Rs < -200, [0.5,0.75]$	大 (4) $Rs < -300, [0.75,1]$
加工后毛刺 B ₂	有 (1) $[0,0.5]$	有 (1) $[0,0.5]$	无 (2) $[0.5,1]$	无 (2) $[0.5,1]$

其中, 根据专家意见, 粗糙度值等级范围分为以上四个等级, 以加工前粗糙度值为基础, 加工后每降低 1/2 数值为提高一个粗糙度等级; 通常, 加工后的毛刺分为有和无, 分别赋值为 0、1, 大部分零件毛刺需要去除, 极少数时用户会要求保留毛刺作为零件的特殊部位; 光亮度按国家标准分为: 可辨加工痕迹方向、无光亮度、较低且没有磨纹、光亮度非常高 4 种等级, 它们被分别赋值为 1、2、3、4。由于不考虑实际案例数据的分布特征, 其他特征值按照所有范围平均划分的原则确定^[132-134], 各特征范围的隶属区间在 $[0,1]$ 上按对应等级进行区间平均划分。

(3) 基于案例的光整加工工艺优选规则的分类分级建立

在基于已有的实际案例数据确定了光整加工工艺优选各特征值的等级范围及隶属区间后,重点研究将同一工艺方案进行加工的案例特征值所在的隶属区间与光整加工工艺建立联系,基于产生式规则表示法建立区间值模糊规则。为方便规则的建立,提出基于滚磨光整加工案例分级分类的规则建立方法,首先要对生产案例进行分级分类,然后通过分析同一类案例建立相应的规则。

由于篇幅所限,下面以滚抛磨块中使用较多的“2号中磨磨块”和“3号粗磨磨块”为例,详细阐述区间值模糊规则的构建。

根据实际案例数据,将使用同一种磨块进行加工的案例特征值所在的隶属区间与滚抛磨块建立联系,构建区间值模糊规则。该规则由多前件多规则组成,每个前件特征值范围用对应等级的隶属区间表示。产生式表示的各规则之间相互独立,其表示形式为:

$$R_i: \text{ IF } A_{i1} \text{ AND } A_{i2} \text{ AND } \dots \text{ AND } A_{ij} \text{ THEN } B_i \quad (4-16)$$

式中, R_i 为规则库中的第 i 条规则; j 为每条规则前件特征的个数; A 为规则的前件特征; B 为规则的结论。

根据被加工零件类型的不同,可以把规则进行分类,建立不同零件类型的规则,在每种类型下,再对零件材质进行分级,在特定的类型和材质下,将同一类磨块加工的案例进行筛选。针对案例数据分布的不同分别建立规则。其中, A_{i1} 到 A_{in} 分别代表长度、轴径、加工前粗糙度、加工前毛刺、加工前光亮度、加工前硬度、加工后粗糙度、加工后毛刺、加工后光亮度、加工后硬度、残余应力改善。

下面以 $\Phi 2MS$ (2号中磨,表格中全用 $\Phi 2MS$ 表示), $\Phi 3RS$ (3号粗磨,表格中使用 $\Phi 3RS$ 表示) 为例进行阐述。

首先需要对生产案例进行分类,按加工后粗糙度是否至少提高一个等级进行一次分类,分为至少提高了一个等级和未提高等级两类;然后在一次分类的基础上依据加工前粗糙度等级进行二次分类,分为 1, 2, 3, 4 一共四个等级,这样所分类别数就是所要建立的规则条数。按照以上分类,进行规则建立,如果按一条规则对应的案例个数分类,可分为单个案例单条规则和多个案例单条规则两类,然后分别对这两类的规则建立进行了举例阐述。

1) 案例分类

在目前轴类零件加工的案例中有 27 种磨块,以其中的 2 号中磨 ($\Phi 2MS$) 为例阐述规则构建,库中使用了 2 号中磨的案例共有 9 个。根据专家意见可知,零件表面粗糙度要求是影响磨块选择的最关键因素,因此,将零件加工前后的粗糙度值划分等级,在各等级下建立规则。

第一步是根据“加工后粗糙度是否至少提高一个等级”将案例分为两类:①加工后粗糙度至少提高了一个等级、②加工后粗糙度未提高等级;第二步在第一步的基础上,根

据加工前粗糙度等级进行二次分类,加工前粗糙度等级根据表 4.2 可分为 1, 2, 3, 4 一共四个等级。最终结合两步分类将案例分类编写规则编号。

(a) 按照零件加工前后粗糙度的比值 G 分类

对于第一步按加工后粗糙度是否提高一个等级分类,这里引入加工前后粗糙度比值 $G: G = \text{加工后粗糙度} / \text{加工前粗糙度}$

按比值 G 是否大于 0.5 进行分类,如果 G 不大于 0.5,则加工后粗糙度至少提高了一个等级,这里记为 0;如果 G 大于 0.5,则加工后粗糙度未提高一个等级,这里记为 1。两类等级如表 4.34 所示。

表 4.34 选用 $\Phi 2MS$ 磨块加工的实际案例第一次分类
Tab. 4.34 The first classification of actual cases using $\Phi 2MS$

No.	L/mm	D/mm	Ra ₁ /μm	B ₁ /mm	Br ₁	H ₂ /HRC	Ra ₂ /μm	B ₂	Br ₂	H ₂ /HRC	Rs/MP	磨块	G	G 等级
1	56	24	0.264	1.397	1	35	0.118	0	3	43	-190	$\Phi 2MS$	0.447	0
2	230	33	0.947	0.65	2	39	0.432	1	4	49	-247	$\Phi 2MS$	0.456	0
3	191	33	1.367	0.76	1	39	0.662	1	4	49	-243	$\Phi 2MS$	0.484	0
4	82	11	0.177	0.823	2	36	0.126	0	3	42	-221	$\Phi 2MS$	0.712	1
5	92	39	0.25	0.99	2	43	0.134	1	3	51	-207	$\Phi 2MS$	0.536	1
6	245	38	0.57	0.71	1	39	0.324	0	3	49	-245	$\Phi 2MS$	0.568	1
7	357	33	0.6	0.55	1	38	0.332	0	4	50	-247	$\Phi 2MS$	0.553	1
8	191	24	0.996	0.95	2	39	0.662	1	4	47	-250	$\Phi 2MS$	0.665	1
9	245	40	1.042	0.64	1	40	0.675	1	3	48	-248	$\Phi 2MS$	0.648	1

由表 4.34 可知,针对 $\Phi 2MS$ 磨块的案例,依据加工前后粗糙度的比值可将案例分为:前三条案例 No.1 至 No.3 和后六条案例 No.4 至 No.9。

(b) 按加工前粗糙度等级范围再次分类

因为加工后的粗糙度等级是以加工前粗糙度为标准来进行判断的,所以有必要对加工前粗糙度等级进行再次分类,即:在第一步分类结果的基础上,按加工前粗糙度 Ra_1 的等级分类,这里根据表 4.32 可将加工前粗糙度等级划分为 1、2、3、4 共四级,分别如表 4.35 和 4.36 所示。

表 4.35 选用 $\Phi 2MS$ 磨块加工的实际案例第二次分类(至少提高一个等级的)
Tab. 4.35 The second classification of actual cases (at least one level higher) using $\Phi 2MS$

No.	L/mm	D/mm	Ra ₁ /μm	B ₁ /mm	Br ₁	H ₁ /HRC	Ra ₂ /μm	B ₂	Br ₂	H ₂ /HRC	Rs/MP	磨块	G 等级	Ra ₁ 等级	规则编号
1	56	24	0.264	1.397	1	35	0.118	0	3	43	-190	$\Phi 2MS$	0	2	R1
2	230	33	0.947	0.65	2	39	0.432	1	4	49	-247	$\Phi 2MS$	0	4	R2
3	191	33	1.367	0.76	1	39	0.662	1	4	49	-243	$\Phi 2MS$	0	4	R2

表 4.36 选用 $\Phi 2MS$ 磨块加工的实际案例第二次分类（未提高等级的）

Tab. 4.36 The second classification of actual cases (not elevated in grade) using $\Phi 2MS$

No.	L/mm	D/mm	Ra ₁ /μm	B ₁ /mm	Br ₁	H ₁ /HRC	Ra ₂ /μm	B ₂	Br ₂	H ₂ /HRC	Rs/MP	磨块	G 等级	Ra ₁ 等级	规则编号
4	82	11	0.177	1.323	2	36	0.126	0	3	42	-221	$\Phi 2MS$	1	1	R3
5	92	39	0.25	0.99	2	43	0.134	1	3	51	-207	$\Phi 2MS$	1	2	R4
6	245	38	0.57	0.71	1	39	0.324	0	3	49	-245	$\Phi 2MS$	1	3	R5
7	357	33	0.6	0.55	1	38	0.332	0	4	50	-247	$\Phi 2MS$	1	3	R5
8	191	24	0.996	0.95	2	39	0.662	1	4	47	-250	$\Phi 2MS$	1	4	R6
9	245	40	1.042	0.64	1	40	0.675	1	3	48	-248	$\Phi 2MS$	1	4	R6

由表 4.35 可知，由 $G=0$ 可以得到 2 条规则，即根据案例 No.1 可建立规则 R1、根据案例 No.2 和案例 3 可建立规则 R2。

由表 4.36 可知，由 $G=1$ 可以得到 4 条规则，即根据案例 No.4 可建立规则 R3、根据案例 No.5 可建立规则 R4、根据案例 No.6 和案例 No.7 可建立规则 R5、根据案例 No.8 和案例 No.9 可建立规则 R6。由此可知，根据使用 $\Phi 2MS$ 磨块的 9 个案例 No.1 至 No.9 可制定 6 条规则 R1 至 R6。

为了全面展示规则的建立，下面再给出 3 号粗磨（ $\Phi 3RS$ ）磨块分类中的 8 条案例 No.10 至 No.17 为例，如表 4.37 所示。

表 4.37 $\Phi 3RS$ 磨块案例数据表

Tab. 4.37 The case data table of $\Phi 3RS$

No.	L/mm	D/mm	Ra ₁ /μm	B ₁ /mm	Br ₁	H ₁ /HRC	Ra ₂ /μm	B ₂	Br ₂	H ₂ /HRC	Rs/MP	磨块	G 等级	Ra ₁ 等级	规则编号
10	565	70	0.839	1.367	2	33	0.529	1	4	42	-214	$\Phi 3RS$	0.631	1	R7
11	410	140	0.844	1.22	2	35	0.607	1	4	47	-251	$\Phi 3RS$	0.838	1	R7
12	260	90	0.918	1.078	2	39	0.582	1	4	50	-253	$\Phi 3RS$	0.634	1	R7
13	234	70	1.025	1.1	2	39	0.55	1	4	49	-252	$\Phi 3RS$	0.537	1	R7
14	350	95	1.987	1.06	2	40	1.056	1	4	50	-220	$\Phi 3RS$	0.531	1	R7
15	440	140	2.641	1.17	2	31	2.571	1	4	43	-271	$\Phi 3RS$	0.973	1	R7
16	340	140	3.019	1.45	2	38	1.964	1	4	48	-210	$\Phi 3RS$	0.651	1	R7
17	340	140	3.361	1.38	2	40	2.407	1	4	47	-215	$\Phi 3RS$	0.716	1	R7

由表 4.37 可知，由于 8 条案例全部是 $G=1$ ，故只对应构建 1 条规则 R7。

按照这种分类分级的建规则思路，可以将目前数据库平台上已有的轴类零件的案例可以划分出 81 条磨块优选的规则。

2) 区间值规则建立

由表 4.35、4.36 和 4.37 对应的规则可知，按照规则所对应的案例的个数可分为单个案例建规则和多个案例建规则两类。下面分别阐述具体的建规则步骤。

① 单个案例对应的单条规则

当规则对应的是单条案例时，可以直接对应表 4.33 中轴类零件特征值范围及隶属区间表，即可建立相应的规则。以表 4.35 中的案例 No.1 对应表 4.33 建立规则的过程如下：

(a) 长度： $L=56<100$ ，属于 $[0.00, 0.25]$ 。

(b) 轴径： $D=24<40$ ，属于 $[0.00, 0.25]$ 。

(c) 加工前粗糙度： $0.2<Ra_1=0.264<0.4$ ，属于 $[0.25, 0.50]$ 。

(d) 加工前毛刺： $1<B_1=1.397<1.5$ ，属于 $[0.50, 0.75]$ 。

(e) 加工前光亮度： $Br_1=1$ ，属于 $[0.00, 0.25]$ 。

(f) 加工前硬度： $H_1=35<40$ ，属于 $[0.00, 0.25]$ 。

(g) 加工后粗糙度： $(\text{加工后粗糙度 } Ra_2) / (\text{加工前粗糙度 } Ra_1) = 0.118/0.264 = 0.447 < 0.5$ ，提高一个等级，又因为加工前粗糙度 Ra_1 属于 $[0.25, 0.50]$ ，所以加工后粗糙度 Ra_2 属于 $[0.00, 0.25]$ 。

注意：由于实际生产中，加工前后粗糙度的变化对工艺参数的优选非常重要，因此在确定加工后粗糙度的隶属区间时，不是直接对应表 4.33 中的粗糙度隶属区间，而是由加工前粗糙度的隶属区间和加工后/前粗糙度的比值 G 共同决定，详见规则 5 的建立。

(h) 加工后毛刺： $B_2=0$ ，属于 $[0.00, 0.25]$ 。

(i) 加工后光亮度： $Br_2=3$ ，属于 $[0.50, 0.75]$ 。

(j) 加工后硬度： $40<H_2=43<50$ ，属于 $[0.25, 0.50]$ 。

(k) 残余应力改善： $-200 < Rs = -190 < -100$ ，属于 $[0.25, 0.50]$ 。

将以上各特征值所对应的隶属区间作为规则前件， $\Phi 2MS$ 磨块作为规则后件，建立规则 R1 如下：

R1: IF $A_{1,1}[0.00,0.25]$ AND $A_{1,2}[0.00,0.25]$ AND $A_{1,3}[0.25,0.50]$ AND
 $A_{1,4}[0.50,0.75]$ AND $A_{1,5}[0.00,0.25]$ AND $A_{1,6}[0.00,0.25]$ AND
 $A_{1,7}[0.00,0.25]$ AND $A_{1,8}[0.00,0.50]$ AND $A_{1,9}[0.50,0.75]$ AND
 $A_{1,10}[0.25,0.50]$ AND $A_{1,11}[0.50,0.75]$
 THEN $\Phi 2MS$ 磨块

同理，根据表 4.36 的案例 No.4 可建立规则 R3，如下所示：

R3: IF $A_{3,1}[0.00,0.25]$ AND $A_{3,2}[0.00,0.25]$ AND $A_{3,3}[0.00,0.25]$ AND
 $A_{3,4}[0.25,0.50]$ AND $A_{3,5}[0.25,0.50]$ AND $A_{3,6}[0.00,0.25]$ AND
 $A_{3,7}[0.00,0.25]$ AND $A_{3,8}[0.00,0.50]$ AND $A_{3,9}[0.50,0.75]$ AND
 $A_{3,10}[0.25,0.50]$ AND $A_{3,11}[0.50,0.75]$

THEN $\Phi 2MS$ 磨块

同理，根据表 4.36 的案例 No.5 可建立规则 R4，如下所示：

R4: IF $A_{4,1}[0.00,0.25]$ AND $A_{4,2}[0.00,0.25]$ AND $A_{4,3}[0.25,0.50]$ AND
 $A_{4,4}[0.25,0.50]$ AND $A_{4,5}[0.25,0.50]$ AND $A_{4,6}[0.25,0.50]$ AND
 $A_{4,7}[0.25,0.50]$ AND $A_{4,8}[0.50,1.00]$ AND $A_{4,9}[0.50,0.75]$ AND
 $A_{4,10}[0.50,0.75]$ AND $A_{4,11}[0.50,0.75]$

THEN $\Phi 2MS$ 磨块

② 多个案例对应的单条规则

如果是两个以上案例，就会出现多组数据，如表 4.38 所示。这时确定特征区间的时候，需要根据每个特征的多个数据，对应表 4.33 轴类零件特征值范围及隶属区间的每个特征的划分标准，当多个数据不只是一个区间范围时，就需要扩大区间以保证每个特征的多个数据均在最终确定的区间内。

表 4.38 规则 R2 和规则 R7 对应案例数据表

Tab. 4.38 The corresponding case data table of R2 and R7

No.	L/mm	D/mm	Ra1/ μm	B1/mm	Br1	H1/HRC	Ra2/ μm	B2	Br2	H2/HRC	Rs/MP	磨块	G 等级	Ra1 等级	规则编号
2	230	33	0.947	0.65	2	39	0.432	1	4	49	-247	$\Phi 2MS$	0.456	0	R2
3	191	33	1.367	0.76	1	39	0.662	1	4	49	-243	$\Phi 2MS$	0.484	0	R2
10	565	70	0.839	1.367	2	33	0.529	1	4	42	-214	$\Phi 3RS$	0.631	1	R7
11	410	140	0.844	1.22	2	35	0.607	1	4	47	-251	$\Phi 3RS$	0.838	1	R7
12	260	90	0.918	1.078	2	39	0.582	1	4	50	-253	$\Phi 3RS$	0.634	1	R7
13	234	70	1.025	1.1	2	39	0.55	1	4	49	-252	$\Phi 3RS$	0.537	1	R7
14	350	95	1.987	1.06	2	40	1.056	1	4	50	-220	$\Phi 3RS$	0.531	1	R7
15	440	140	2.641	1.17	2	31	2.571	1	4	43	-271	$\Phi 3RS$	0.973	1	R7
16	340	140	3.019	1.45	2	38	1.964	1	4	48	-210	$\Phi 3RS$	0.651	1	R7
17	340	140	3.361	1.38	2	40	2.407	1	4	47	-215	$\Phi 3RS$	0.716	1	R7

(a) 两个案例对应的单条规则

根据表 4.38 可知，案例 No.2 和案例 No.3 对应磨块为 $\Phi 2MS$ ，规则为 R2，各特征值及对应的等级和隶属区间如表 4.39 所示。

表 4.39 规则 R2 特征区间划分对应表

Tab. 4.39 The corresponding table of feature interval division of rule R2

特征	No.2	No.3	特征值区间	隶属等级	隶属区间
长度 L/mm	230	191	$100 < L < 300$	2	[0.25, 0.50]
轴径 D/mm	33	33	$0 < D < 40$	1	[0.00, 0.25]
前粗糙度 $Ra_1/\mu m$	0.947	1.367	$Ra_1 > 0.8$	4	[0.75, 1.00]
前毛刺 B_1/m	0.65	0.76	$0.5 < B_1 < 1$	2	[0.25, 0.50]
前光亮度 Br_1	2	1	无	1、2	[0.00, 0.50]
前硬度 H_1/HRC	39	39	$0 < H_1 < 40$	1	[0.00, 0.25]
后粗糙度 $Ra_2/\mu m$	0.432	0.662	$G \leq 0.5$	3	[0.50, 0.75]
后毛刺 B_2	1	1	无	2	[0.50, 1.00]
后光亮度 Br_2	4	4	无	4	[0.75, 1.00]
后硬度 H_2/HRC	49	49	$40 < H_2 < 50$	2	[0.25, 0.50]
残余应力 Rs/MP	-247	-243	$-300 < Rs < -200$	3	[0.50, 0.75]

由表 4.39 可知, 案例 No.2 和案例 No.3 只有“加工前光亮度”这个特征的隶属等级不同, 所以需要扩大区间, 即: No.2 的光亮度 $Br_1=2$, 属于[0.25,0.50]、No.3 的光亮度 $Br_1=1$, 属于[0.00, 0.25], 因此扩大区间为[0.00, 0.5], 可以使 No.2 和 No.3 的光亮度均属于该区间。

将表中各特征值所对应的隶属区间作为规则前件, $\Phi 2MS$ 磨块作为规则后件, 建立规则 R2 如下:

R2: IF $A_{2,1}[0.25,0.50]$ AND $A_{2,2}[0.00,0.25]$ AND $A_{2,3}[0.75,1.00]$ AND
 $A_{2,4}[0.25,0.50]$ AND $A_{2,5}[0.00,0.50]$ AND $A_{2,6}[0.00,0.25]$ AND
 $A_{2,7}[0.50,0.75]$ AND $A_{2,8}[0.50,1.00]$ AND $A_{2,9}[0.75,1.00]$ AND
 $A_{2,10}[0.25,0.50]$ AND $A_{2,11}[0.50,0.75]$
 THEN $\Phi 2MS$

同理, 根据表 4.36 的案例 No.6 和案例 No.7 建立规则 R5, 如下所示:

R5: IF $A_{5,1}[0.25,0.75]$ AND $A_{5,2}[0.00,0.25]$ AND $A_{5,3}[0.50,0.75]$ AND
 $A_{5,4}[0.25,0.50]$ AND $A_{5,5}[0.00,0.25]$ AND $A_{5,6}[0.00,0.25]$ AND
 $A_{5,7}[0.50,0.75]$ AND $A_{5,8}[0.00,0.50]$ AND $A_{5,9}[0.50,1.00]$ AND
 $A_{5,10}[0.25,0.50]$ AND $A_{5,11}[0.50,0.75]$
 THEN $\Phi 2MS$

同理, 根据表 4.36 的案例 No.8 和案例 No.9 建立规则 R6, 如下所示:

R6: IF $A_{6,1}[0.25,0.50]$ AND $A_{6,2}[0.00,0.25]$ AND $A_{6,3}[0.75,1.00]$ AND
 $A_{6,4}[0.25,0.50]$ AND $A_{6,5}[0.00,0.50]$ AND $A_{6,6}[0.00,0.25]$ AND

$A_{6,7}[0.75,1.00]$ AND $A_{6,8}[0.50,1.00]$ AND $A_{6,9}[0.50,1.00]$ AND
 $A_{6,10}[0.25,0.50]$ AND $A_{6,11}[0.50,0.75]$
 THEN $\Phi 2MS$

(b) 多个案例对应的单条规则

根据表 4.37 给出 3 号粗磨 ($\Phi 3RS$) 磨块分类中的 8 条案例 No.10-17 各特征值及对应的等级和隶属区间, 可以得到如表 4.40 所示的规则 7 的特征区间划分对应表。

表 4.40 规则 R7 特征区间划分对应表

Tab. 4.40 The corresponding table of feature interval division of rule R7

特征	10	11	12	13	14	15	16	17	特征值区间	隶属等级	隶属区间
L/mm	565	410	260	234	350	440	340	340	$L > 100$	2、3、4	[0.25, 1.00]
D/mm	70	140	90	70	95	140	140	140	$D > 40$	2、3、4	[0.25, 1.00]
$Ra_1/\mu m$	0.839	0.844	0.918	1.025	1.987	2.641	3.019	3.361	$Ra_1 > 0.8$	4	[0.75, 1.00]
B_1/m	1.367	1.22	1.078	1.1	1.06	1.17	1.45	1.38	$1 < B_1 < 1.5$	3	[0.50, 0.75]
Br_1	2	2	2	2	2	2	2	2	无	2	[0.25, 0.50]
H_1/HRC	33	35	39	39	40	31	38	40	$H_1 \leq 40$	1	[0.00, 0.25]
$Ra_2/\mu m$	0.529	0.607	0.582	0.55	1.056	2.571	1.964	2.407	$G > 0.5$	4	[0.75, 1.00]
B_2	1	1	1	1	1	1	1	1	无	2	[0.50, 1.00]
Br_2	4	4	4	4	4	4	4	4	无	4	[0.75, 1.00]
H_2/HRC	42	47	50	49	50	43	48	47	$40 < H_2 \leq 50$	2	[0.25, 0.50]
Rs/MP	-214	-251	-253	-252	-220	-271	-210	-215	$-300 < Rs < -200$	3	[0.50, 0.75]

由表 4.40 可知, 案例 No.10 至案例 No.17 中有长度和轴径的隶属等级不同, 所以需要相应扩大各特征的隶属区间, 以保证该特征的两个数据均在最终确定的隶属区间内。将表中各特征值所对应的隶属区间作为规则前件, $\Phi 3RS$ 磨块作为规则后件, 建立规则 R7 如下:

R7: IF $A_{7,1}[0.25,1.00]$ AND $A_{7,2}[0.25,1.00]$ AND $A_{7,3}[0.75,1.00]$ AND
 $A_{7,4}[0.50,0.75]$ AND $A_{7,5}[0.25,0.50]$ AND $A_{7,6}[0.00,0.25]$ AND
 $A_{7,7}[0.75,1.00]$ AND $A_{7,8}[0.50,1.00]$ AND $A_{7,9}[0.75,1.00]$ AND
 $A_{7,10}[0.25,0.50]$ AND $A_{7,11}[0.50,0.75]$

THEN $\Phi 3RS$

综上所述, 采用构建滚抛磨块规则的“分类分级法”, 可以构建出光整加工其它各工艺参数的优选规则。由于影响各工艺参数的主要案例特征有所不同, 所以在建立各自的优选规则时, 分级依据有所不同。例如: 1) 依据“加工后/前粗糙度比 G 和加工前粗糙度”对磨块进行分级建规则; 2) 依据“零件尺寸”对设备进行分级建规则; 3) 通常磨液的选择以零件大类材质为主导。若某一种铸铁, 活性很高的化加工完极易氧化生锈,

这时就应该考虑在特种化学剂加强防锈功能。因此,在建立各参数规则时,需要结合生产实际和专家知识,合理选择并及时调整构建规则的依据,以便能够快速、准确优选出合理可行的加工工艺参数。

(4) 滚磨光整加工工艺优选的推理机设计

推理机控制和协调整个专家系统的工作,是实现光整加工工艺优选的关键,它按照一定的推理算法,通过访问知识库中的知识来寻找问题的解答。光整加工工艺优选专家系统实现的关键就是针对系统控制策略的制定问题,选取合适的推理方法,完成系统推理机的设计。在执行过程中,将推理机与知识库相结合,实现光整加工工艺的智能优选。

在加工工艺专家系统中,推理机采用不同的推理策略,完成加工方法的选择、排序、工艺路线生成等目标。通过推理得出合理的工艺设计,实现智能推理。根据控制策略的不同,推理机的实现方法也有所不同。

定义 1: 令 $D[0,1]$ 定义为区间 $[0,1]$ 上所有闭子空间构成的族,对任意的 $[a_1, b_1], [a_2, b_2] \in D[0,1]$, 且有以下基本的运算成立:

- ① $[a_1, b_1] \vee [a_2, b_2] = [a_1 \vee a_2, b_1 \vee b_2]$,
- ② $k[a_1, b_1] = [k a_1, k b_1]$ 。

定义 2: 一个映射 $A: X \rightarrow D[0,1]$ 称为 X 上的一个区间值模糊集,即:对任意的 $x \in X$, 有 $A(x) = [A^-(x), A^+(x)] \in D[0,1]$ 。记 $IvF(X)$ 为 X 上所有区间值模糊集的集合。

定义 3: 令 $A, B \in IvF(X)$ 为 X 上的两个区间值模糊集,则有下面的性质成立:

- ① $A \cap B = \{(x_i, [A^-(x_i) \wedge B^-(x_i), A^+(x_i) \wedge B^+(x_i)]) / x_i \in X\}$;
- ② $\rho A = \{(x_i, [\rho A^-(x_i), \rho A^+(x_i)]) / x_i \in X\}$ 。

定义 4: 函数 $S: IvF(X) \times IvF(X) \rightarrow [0,1]$ 定义为 A 与 B 之间的相似度 $S(A, B)$, 有以下性质成立:

- ① $0 \leq S(A, B) \leq 1$;
- ② $S(A, B) = 1$ 当且仅当 $A = B$;
- ③ $S(A, B) = S(B, A)$;
- ④ 如果 $A \subseteq B, B \subseteq C$, 则有 $S(A, C) \leq S(A, B), S(A, C) \leq S(B, C)$ 。

定义 5: 假设 $A, B \in IvF(X)$, $A = \sum_{x_i \in X} [A^-(x_i), A^+(x_i)] / x_i$, $B = \sum_{x_i \in X} [B^-(x_i), B^+(x_i)] / x_i$ 。 $A, B \in IvF(X)$ 的区间值相似度定义为:

$$Sim(A, B) = \frac{S(A^-, B^-) + S(A^+, B^+)}{2} = 1 - \frac{|A^- - B^-| + |A^+ - B^+|}{2}$$

在滚磨光整加工工艺优选中,模糊规则是由多条规则多个前件组成的,属于多重多

维情况下的模糊推理^[135]，即：

已知规则 R1: IF A_{11} AND A_{12} AND ... A_{1j} ... AND A_{1m} THEN B_1
 \vdots

Rn: IF A_{n1} AND A_{n2} AND ... A_{nj} ... AND A_{nm} THEN B_n

给定问题: $A_1^* \text{ AND } A_2^* \text{ AND } \dots A_j^* \text{ AND } \dots A_m^*$
 求: B^*

其中：前件 A_{ij} 和 A_j^* 分别是 X 上的区间值模糊集($j=1,2,\dots,m; i=1,2,\dots,n$)；结论 B_i 与 B^* 是 Y 上的区间值模糊集。

因此，本文提出区间值模糊规则推理算法进行系统推理机的设计。该方法可以减少推理过程中模糊信息的丢失，比一般模糊集更适合用于模糊推理。

当给定新零件信息时，基于区间值模糊推理的光整加工工艺优选步骤如下：

Step 1: 计算特征的区间相似度

当给定被加工零件特征 A_{ij}^* 时，计算其与各条光整加工工艺优选规则前件特征 A_{ij} 的相似度 $\alpha_{ij} = SIM(A_{ij}^*, A_{ij})$ 。采用的区间相似度函数为^[136]：

$$\alpha_{ij} = SIM(A_{ij}^*, A_{ij}) = 1 - \frac{|A_{ij}^{*-} - A_{ij}^{-}| + |A_{ij}^{*+} - A_{ij}^{+}|}{2} \quad (4-17)$$

式中， A_{ij}^{*-} 与 A_{ij}^{*+} 分别是被加工零件特征区间值的下限与上限， A_{ij}^{-} 与 A_{ij}^{+} 分别是规则前件特征区间值的下限与上限。

Step 2: 计算规则综合加权相似度

计算各条规则的综合加权相似度 CS_i ，确定激活规则。 CS_i 的计算公式如下：

$$CS_i = \sum_{j=1}^m w_j \alpha_{ij} \quad (4-18)$$

式中， CS_i 为第 i 条规则的综合加权相似度， $i=1,2,\dots,n$ ； w_j 为各特征权重值， $j=1,2,\dots,m$ 。在滚磨光整加工工艺优选推理过程中，各特征因素对工艺优选的影响程度不同，因此在推理过程中需要赋予合理的特征权值。特征权值反映了规则前件的各特征对判断结果的重要程度，对推理结果影响显著。本文采用 4.2.1 中研究的层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)确定特征属性权重值，在此不再详述。

Step 3: 计算推理结果

若 $CS_i \geq CS_{th}$ ，其中 $CS_{th} \in [0,1]$ ， $1 \leq i \leq n$ ，即：综合加权相似度大于等于设定阈值时，则第 i 条光整加工工艺优选规则被激活。

①当有多个规则被激活：

设 $MS = \max_{1 \leq i \leq n} (CS_i)$ ，令 $MF = MS - \Delta$ ，其中 Δ 是一个很小的正数，通常取 0.01 到 0.05。

令集合 $I_1 = \{i | \text{第 } i \text{ 条规则被激活, 且 } CS_i \in (MS - \Delta, MS), 1 \leq i \leq n\}$ ：

$$B_1^* = \bigcup_{i \in I_1} \frac{1}{L_1} \left(\frac{1+MF}{2} \right) B_i \quad (4-19)$$

令集合 $I_2 = \{i \mid \text{第 } i \text{ 条规则被激活, 且 } CS_i \notin (MS - \Delta, MS), 1 \leq i \leq n\}$:

$$B_2^* = \bigcup_{i \in I_2} \frac{1}{L_2} \left(\frac{1-MF}{2} \right) B_i \quad (4-20)$$

最终的加工工艺参数的推理结果:

$$B^* = B_1^* \cup B_2^* \quad (4-21)$$

即: 选择被激活规则后件中系数最大的一个规则后件作为光整加工工艺优选的结果。

②若没有规则被激活, 则根据滚磨光整加工领域专家经验, 可以调整各特征权重值 w_j , 或者适当调整阈值, 重新进行综合推理, 判断激活规则, 得出加工工艺。

在各工艺参数分别建立规则后, 依据上述区间值模糊推理方法, 并参考实际加工过程中, 选择工艺参数的顺序逐个优选工艺参数。为保证优选出的工艺方案是案例库中已有的方案, 首先根据待加工零件特征及加工要求从“磨块规则库”中优选出磨块, 然后在案例库中找出这种磨块所对应的全部案例, 再根据这些案例中用到的所有的设备种类, 找到“设备规则库”中规则后件是这些设备的规则进行推理, 优选出采用这种磨块时的设备, 这样优选出的磨块和设备的组合就是案例库中已有的。以此类推, 再优选出磨液和加工时间, 这样可以保证优选出一套工艺方案是案例库中已经使用过的方案。

总之, 根据影响各工艺参数的规则特征的重要程度不同, 构建各工艺参数的规则, 然后逐个优选工艺参数, 并根据优选出的某个工艺参数缩减规则库, 以保证优选出的工艺方案是案例库中本身存在的, 即曾经使用过的一套工艺方案。

4.3.3 仿真研究

为了验证本文提出的基于专家推理的光整加工工艺优选模型的可行性和合理性, 本文采用没有参与规则建立的大量实际的成功案例作为测试数据进行仿真研究。同时由于特征权重对推理结果有一定的影响, 故分别采用了不同特征权重下进行了仿真, 并将推理结果与测试案例结果进行对比。由于篇幅所限, 下面只给出了采用特征等权重和采用层次分析法得出的两种特征权重下的三组各 15 个案例的对比结果, 如表 4.41 和表 4.42 所示。三种不同的特征权重设定如下:

$$W1 = [1/11, 1/11, 1/11, 1/11, 1/11, 1/11, 1/11, 1/11, 1/11, 1/11, 1/11]$$

$$W2 = [0.0821, 0.0274, 0.1699, 0.0662, 0.0438, 0.0291, 0.2541, 0.1479, 0.0958, 0.052, 0.0318]$$

$$W3 = [0.0304, 0.0304, 0.165, 0.0979, 0.0565, 0.0337, 0.2413, 0.1672, 0.0861, 0.0559, 0.0356]$$

表 4.41 第一组案例采用 W1 的仿真推理结果对比表

Tab. 4.41 The comparison table of simulation reasoning results adopting W1 of the first group cases

No.	A ₁ / mm	A ₂ / mm	A ₃ / μm	A ₄ / mm	A ₅	A ₆ / HRC	A ₇ / μm	A ₈	A ₉	A ₁₀ / HRC	A ₁₁ / MP	磨块	测试案例结果			磨块	采用 W1 的推理结果		
													设备	磨液	加工时间/min		设备	磨液	加工时间/min
1	300	106	0.51	1.73	2	39	0.433	1	4	48	-154	16 号中磨	X400	钢磨液	16	16 号中磨	X400	钢磨液	16
2	175	35	0.236	0.74	2	30	0.095	1	4	42	-234	2 号精磨	X400	钢磨液	12	7 号树脂	L60	钢磨液	30
3	47	40	0.268	0.88	2	33	0.136	1	4	44	-175	2 号精磨	X400	钢磨液	16	2 号精磨	L05	钢磨液	20
4	92	39	0.25	0.99	2	43	0.134	1	3	51	-207	2 号中磨	X400	钢磨液	16	2 号中磨	X400	钢磨液	16
5	595	60	0.3305	0.7	1	32	0.143	1	3	39	-212	3 号超精磨	W1300	钢磨液	16	3 号超精磨	W900	钢磨液	10
6	270	38	0.73	0.79	2	33	0.351	1	4	42	-271	3 号超精磨	X400	钢磨液	16	2 号精磨	W1300	钢磨液	16
7	340	70	2.846	0.92	1	49	0.851	1	3	58	-200	3 号粗磨	X400	钢磨液	16	3 号粗磨	W900、W1300	钢磨液	30+20
8	370	42	0.211	1.023	1	31	0.175	1	4	42	-206	3 号粗磨	W1300	钢磨液	30	3 号粗磨	W2100	钢磨液	40
9	163	45	0.606	0.956	1	40	0.573	1	3	50	-158	3 号粗磨	X400	钢磨液	6	3 号粗磨	W1600	钢磨液	30
10	500	51	0.247	0.78	2	48	0.081	0	4	57	-180	3 号精磨	W1300	钢磨液	20	3 号精磨	W900	钢磨液	20
11	60	16	0.265	0.93	2	32	0.083	0	4	46	-273	3 号精磨	L80	钢磨液	20	2 号中磨	LL05	钢磨液	8+4
12	104	13	0.786	0.7	1	38	0.236	1	3	46	-200	3 号精磨	X400	铝磨液	16	3 号中磨	L80	钢磨液	40
13	564	90.5	1.577	0.59	1	43	0.776	0	4	48	-170	3 号中磨	W1300	钢磨液	92	3 号中磨	W1600	铝磨液	120
14	82	17	2.145	0.73	1	32	0.965	1	2	41	-223	5 号粗磨	LL05	钢磨液	10	5 号粗磨	LL05	钢磨液 +铝磨液	60+5
15	292	103	2.439	1.4	1	41	1.342	1	3	51	-210	斜三角 2*2	X400	钢磨液	20+10	斜三角 2*2	LL05	钢磨液	5

由表 4.41 可知, 对上述 15 组测试案例的仿真研究中, 采用等权重 $W1$ 推理的结果是: 磨块有 10 个案例推理结果与实际案例结果一致, 准确率为 66.7%; 设备有 3 个案例推理结果与实际案例类型一致, 准确率为 20%; 磨液有 12 个案例推理结果与实际案例结果一致, 准确率为 80%; 加工时间有 4 个案例推理结果与实际案例结果一致, 准确率为 26.7%。

表 4.42 第一组案例采用 W2 的仿真推理结果对比表

Tab. 4.42 The comparison table of simulation reasoning results adopting W2 of the first group cases

No.	A ₁ / mm	A ₂ / mm	A ₃ / μm	A ₄ / mm	A ₅	A ₆ / HRC	A ₇ / μm	A ₈	A ₉	A ₁₀ / HRC	A ₁₁ / MP	磨块	测试案例结果			采用 W2 的推理结果			
													设备	磨液	加工时间/min	磨块	设备	磨液	加工时间/min
1	300	106	0.51	1.73	2	39	0.433	1	4	48	-154	16 号中磨	X400	钢磨液	16	16 号中磨	X400	铝磨液	6
2	175	35	0.236	0.74	2	30	0.095	1	4	42	-234	2 号精磨	X400	钢磨液	12	2 号精磨	W1600	钢磨液	20
3	47	40	0.268	0.88	2	33	0.136	1	4	44	-175	2 号精磨	X400	钢磨液	16	2 号精磨	L05	钢磨液	20
4	92	39	0.25	0.99	2	43	0.134	1	3	51	-207	2 号中磨	X400	钢磨液	16	2 号中磨	X400	钢磨液	16
5	595	60	0.3305	0.7	1	32	0.143	1	3	39	-212	3 号超精磨	W1300	钢磨液	16	3 号超精磨	W900	钢磨液	10
6	270	38	0.73	0.79	2	33	0.351	1	4	42	-271	3 号超精磨	X400	钢磨液	16	3 号超精磨	W1300	钢磨液	16
7	340	70	2.846	0.92	1	49	0.851	1	3	58	-200	3 号粗磨	X400	钢磨液	16	3 号粗磨	W900、W1300	钢磨液	30+20
8	370	42	0.211	1.023	1	31	0.175	1	4	42	-206	3 号粗磨	W1300	钢磨液	30	3 号粗磨	W2100	钢磨液	40
9	163	45	0.606	0.956	1	40	0.573	1	3	50	-158	3 号粗磨	X400	钢磨液	6	3 号粗磨	W1300	钢磨液	6
10	500	51	0.247	0.78	2	48	0.081	0	4	57	-180	3 号精磨	W1300	钢磨液	20	3 号精磨	W900	钢磨液	20
11	60	16	0.265	0.93	2	32	0.083	0	4	46	-273	3 号精磨	L80	钢磨液	20	3 号精磨	L80	钢磨液	15
12	104	13	0.786	0.7	1	38	0.236	1	3	46	-200	3 号精磨	X400	铝磨液	16	3 号精磨	L80	钢磨液	20
13	564	90.5	1.577	0.59	1	43	0.776	0	4	48	-170	3 号中磨	W1300	钢磨液	92	斜三角 8*8	ZY600	铝磨液	360
14	82	17	2.145	0.73	1	32	0.965	1	2	41	-223	5 号粗磨	LL05	钢磨液	10	5 号粗磨	LL05	钢磨液	10
15	292	103	2.439	1.4	1	41	1.342	1	3	51	-210	斜三角 2*2	X400	钢磨液	20+10	斜三角 2*2	LL05	钢磨液	5

由表 4.42 可知，对上述 15 组测试案例的仿真研究中，采用第一种变权重 W2 的推理结果是：磨块有 14 个案例推理结果与实际案例结果一致，准确率为 93.3%。设备有 4 个案例推理结果与实际案例类型一致，准确率为 26.7%。磨液有 12 个案例推理结果与实际案例结果一致，准确率为 80%。加工时间有 5 个案例推理结果与实际案例结果一致，准确率为 33.3%。

表 4.43 第一组案例采用 W3 的仿真推理结果对比表

Tab. 4.43 The comparison table of simulation reasoning results adopting W3 of the first group cases

No.	A ₁ / mm	A ₂ / mm	A ₃ / μm	A ₄ / mm	A ₅	A ₆ / HRC	A ₇ / μm	A ₈	A ₉	A ₁₀ / HRC	A ₁₁ / MP	测试案例结果				采用 W3 的推理结果			
												磨块	设备	磨液	加工时间/min	磨块	设备	磨液	加工时间/min
1	300	106	0.51	1.73	2	39	0.433	1	4	48	-154	16 号中磨	X400	钢磨液	16	16 号中磨	X400	钢磨液	16
2	175	35	0.236	0.74	2	30	0.095	1	4	42	-234	2 号精磨	X400	钢磨液	12	2 号精磨	W1600	钢磨液	20
3	47	40	0.268	0.88	2	33	0.136	1	4	44	-175	2 号精磨	X400	钢磨液	16	2 号精磨	L05	钢磨液	20
4	92	39	0.25	0.99	2	43	0.134	1	3	51	-207	2 号中磨	X400	钢磨液	16	2 号中磨	X400	钢磨液	16
5	595	60	0.3305	0.7	1	32	0.143	1	3	39	-212	3 号超精磨	W1300	钢磨液	16	3 号超精磨	W900	钢磨液	10
6	270	38	0.73	0.79	2	33	0.351	1	4	42	-271	3 号超精磨	X400	钢磨液	16	3 号超精磨	X400	钢磨液	16
7	340	70	2.846	0.92	1	49	0.851	1	3	58	-200	3 号粗磨	X400	钢磨液	16	3 号粗磨	W900、W1300	钢磨液	30+20
8	370	42	0.211	1.023	1	31	0.175	1	4	42	-206	3 号粗磨	W1300	钢磨液	30	3 号粗磨	W2100	钢磨液	40
9	163	45	0.606	0.956	1	40	0.573	1	3	50	-158	3 号粗磨	X400	钢磨液	6	3 号粗磨	W900、W1300	钢磨液	30+20
10	500	51	0.247	0.78	2	48	0.081	0	4	57	-180	3 号精磨	W1300	钢磨液	20	3 号精磨	W900	钢磨液	20
11	60	16	0.265	0.93	2	32	0.083	0	4	46	-273	3 号精磨	L80	钢磨液	20	3 号精磨	L80	钢磨液	15
12	104	13	0.786	0.7	1	38	0.236	1	3	46	-200	3 号精磨	X400	铝磨液	16	3 号精磨	X400、L60	钢磨液	26+5
13	564	90.5	1.577	0.59	1	43	0.776	0	4	48	-170	3 号中磨	W1300	钢磨液	92	3 号中磨	W1600	铝磨液	120
14	82	17	2.145	0.73	1	32	0.965	1	2	41	-223	5 号粗磨	LL05	钢磨液	10	5 号粗磨	LL05	钢磨液	10
15	292	103	2.439	1.4	1	41	1.342	1	3	51	-210	斜三角 2*2	X400	钢磨液	20+10	斜三角 2*2	LL05	钢磨液	5

由表 4.43 可知，对上述 15 组测试案例的仿真研究中，采用第二种变权重 W3 的推理结果是：磨块有 15 个案例推理结果与实际案例结果一致，准确率为 100%。设备有 5 个案例推理结果与实际案例类型一致，准确率为 33.3%。磨液有 13 个案例推理结果与实际案例结果一致，准确率为 86.7%。加工时间有 5 个案例推理结果与实际案例结果一致，准确率为 33.3%。

表 4.44 第二组案例采用 W1 的仿真推理结果对比表

Tab. 4.44 The comparison table of simulation reasoning results adopting W1 of the second group cases

No.	A ₁ / mm	A ₂ / mm	A ₃ / μm	A ₄ / mm	A ₅	A ₆ / HRC	A ₇ / μm	A ₈	A ₉	A ₁₀ / HRC	A ₁₁ / MP	磨块	测试案例结果			采用 W1 的推理结果			
													设备	磨液	加工时间/min	磨块	设备	磨液	加工时间/min
16	150	40	0.298	0.58	2	32	0.102	1	4	44	-273	2 号精磨	X400	钢磨液	24	7 号树脂	L60	钢磨液	30
17	465	50	0.202	0.56	2	38	0.121	1	4	47	-150	2 号精磨	W1300	钢磨液	20	2 号精磨	L05	钢磨液	20
18	230	33	0.947	0.65	2	39	0.432	1	4	49	-247	2 号中磨	X400	钢磨液	40	2 号中磨	LL05	钢磨液	30
19	60	38	0.168	0.36	2	58	0.088	0	3	62	-192	3P10 目黑 氧化铝	X1400	钢磨液	20	3P10 目黑氧 化铝	X1400	铝磨液	20
20	280	106.	0.296	0.85	1	35	0.13	1	4	45	-274	3 号粗磨	W2100	钢磨液	40	3 号粗磨	W2100	钢磨液	40
21	340	140	3.019	1.45	2	38	1.964	1	4	48	-210	3 号粗磨	X400	铝磨液	30	Φ1.5 钢球	瀑布机	钢磨液	30
22	66.5	10	0.329	0.99	2	37	0.145	0	4	46	-265	3 号精磨	X400	铝磨液	16	2 号中磨	LL05	钢磨液	8+4
23	115	18	0.069	0.99	2	50	0.053	0	4	56	-194	3 号精磨	X400	钢磨液	16	3 号精磨	L80、L05	钢磨液	30
24	740	58.3	0.3	0.95	2	34	0.19	0	4	42	-256	3 号精磨	W900	钢磨液	20	3 号精磨	W900	钢磨液	20
25	350	42	0.433	0.789	2	33	0.354	0	4	40	-187	3 号精磨	W1300	钢磨液	10	3 号精磨	W1300 和磨 料刷	钢磨液	8+4
26	130	115	0.912	0.92	2	41	0.411	0	4	47	-148	3 号中磨	W1600	铝磨液	120	3 号中磨	W1600	钢磨液	120
27	135	32	0.221	0.856	2	32	0.206	1	4	40	-226	3 号中磨	X400	钢磨液	36	4 号精磨	X400、L60	钢磨液	8
28	135	32	0.221	0.856	2	32	0.206	1	4	40	-226	3 号中磨	X400	钢磨液	42	3 号超精	X400、L60	钢磨液	8
29	764	179.	1.577	0.95	2	33	0.907	1	4	44	-274	3 号中磨	W1300	钢磨液	32	3 号中磨	W1300	钢磨液	32
30	240	56	0.839	1.36	1	33	0.345	1	3	41	-216	4 号中磨	X400、L60	钢磨液	20	4 号中磨	X400、L60	钢磨液	20

由表 4.44 可知，对上述 15 组测试案例的仿真研究中，采用等权重 W1 的推理结果是：磨块有 12 个案例推理结果与实际案例结果一致，准确度为 66.7%。设备有 6 个案例推理结果与实际案例类型一致，准确率为 40%。磨液有 11 个案例推理结果与实际案例结果一致，准确率为 73.3%。加工时间有 8 个案例推理结果与实际案例结果一致，准确率为 53.3%。

表 4.45 第二组案例采用 W2 的仿真推理结果对比表

Tab. 4.45 The comparison table of simulation reasoning results adopting W2 of the second group cases

No.	A1/ mm	A2/ mm	A3/ μm	A4/ mm	A5	A6/ HRC	A7/ μm	A8	A9	A10/ HRC	A11/ MP	磨块	测试案例结果			磨块	采用 W2 的推理结果		
													设备	磨液	加工时间/min		设备	磨液	加工时间/min
16	150	40	0.298	0.58	2	32	0.102	1	4	44	-273	2 号精磨	X400	钢磨液	24	2 号精磨	W1600	钢磨液	20
17	465	50	0.202	0.56	2	38	0.121	1	4	47	-150	2 号精磨	W1300	钢磨液	20	2 号精磨	L05	钢磨液	20
18	230	33	0.947	0.65	2	39	0.432	1	4	49	-247	2 号中磨	X400	钢磨液	40	2 号中磨	X400	钢磨液	40
19	60	38	0.168	0.36	2	58	0.088	0	3	62	-192	3P10 目黑 氧化铝	X1400	钢磨液	20	3P10 目黑 氧化铝	X1400	铝磨液	20
20	280	106	0.296	0.85	1	35	0.13	1	4	45	-274	3 号粗磨	W2100	钢磨液	40	3 号粗磨	W2100	钢磨液	40
21	340	140	3.019	1.45	2	38	1.964	1	4	48	-210	3 号粗磨	X400	铝磨液	30	3 号粗磨	X600	钢磨液	20
22	66.5	10	0.329	0.99	2	37	0.145	0	4	46	-265	3 号精磨	X400	铝磨液	16	3 号精磨	L80	钢磨液	15
23	115	18	0.069	0.99	2	50	0.053	0	4	56	-194	3 号精磨	X400	钢磨液	16	3 号精磨	X400、L60	钢磨液	26+5
24	740	58.3	0.3	0.95	2	34	0.19	0	4	42	-256	3 号精磨	W900	钢磨液	20	Φ3GGL	W1300	钢磨液	90+60+60
25	350	42	0.433	0.789	2	33	0.354	0	4	40	-187	3 号精磨	W1300	钢磨液	10	3 号精磨	W1300 和磨 料刷	钢磨液	8+4
26	130	115	0.912	0.92	2	41	0.411	0	4	47	-148	3 号中磨	W1600	铝磨液	120	3 号中磨	W1600	钢磨液	120
27	135	32	0.221	0.856	2	32	0.206	1	4	40	-226	3 号中磨	X400	钢磨液	36	3 号中磨	X400、L60	钢磨液	8
28	135	32	0.221	0.856	2	32	0.206	1	4	40	-226	3 号中磨	X400	钢磨液	42	3 号中磨	X400、L60	钢磨液	8
29	764	179	1.577	0.95	2	33	0.907	1	4	44	-274	3 号中磨	W1300	钢磨液	32	3 号中磨	W900	钢磨液	20
30	240	56	0.839	1.36	1	33	0.345	1	3	41	-216	4 号中磨	X400、L60	钢磨液	20	4 号中磨	X400、L60	钢磨液	20

由表 4.45 可知，对上述 15 组测试案例的仿真研究中，采用第一种变权重 W2 的推理结果是：磨块有 14 个案例推理结果与实际案例结果一致，准确率为 93.3%。设备有 5 个案例推理结果与实际案例类型一致，准确率为 33.3%。磨液有 11 个案例推理结果与实际案例结果一致，准确率为 73.3%。加工时间有 6 个案例推理结果与实际案例结果一致，准确率为 40%。

表 4.46 第二组案例采用 W3 的仿真推理结果对比表

Tab. 4.46 The comparison table of simulation reasoning results adopting W3 of the second group cases

No.	A ₁ / mm	A ₂ / mm	A ₃ / μm	A ₄ / mm	A ₅	A ₆ / HRC	A ₇ / μm	A ₈	A ₉	A ₁₀ / HRC	A ₁₁ / MP	磨块	测试案例结果				采用 W3 的推理结果		
													设备	磨液	加工时间/min	磨块	设备	磨液	加工时间/min
16	150	40	0.298	0.58	2	32	0.102	1	4	44	-273	2 号精磨	X400	钢磨液	24	2 号精磨	W1600	钢磨液	20
17	465	50	0.202	0.56	2	38	0.121	1	4	47	-150	2 号精磨	W1300	钢磨液	20	2 号精磨	L05	钢磨液	20
18	230	33	0.947	0.65	2	39	0.432	1	4	49	-247	2 号中磨	X400	钢磨液	40	2 号中磨	X400	钢磨液	40
19	60	38	0.168	0.36	2	58	0.088	0	3	62	-192	3P10 目黑	X1400	钢磨液	20	3P10 目黑	X1400	铝磨液	20
20	280	106	0.296	0.85	1	35	0.13	1	4	45	-274	3 号粗磨	W2100	钢磨液	40	3 号粗磨	W2100	钢磨液	40
21	340	140	3.019	1.45	2	38	1.964	1	4	48	-210	3 号粗磨	X400	铝磨液	30	3 号粗磨	X600	钢磨液	20
22	66.5	10	0.329	0.99	2	37	0.145	0	4	46	-265	3 号精磨	X400	铝磨液	16	3 号精磨	L80	钢磨液	15
23	115	18	0.069	0.99	2	50	0.053	0	4	56	-194	3 号精磨	X400	钢磨液	16	3 号精磨	X400、L60	钢磨液	26+5
24	740	58.3	0.3	0.95	2	34	0.19	0	4	42	-256	3 号精磨	W900	钢磨液	20	24 目异形	X400	钢磨液	8
25	350	42	0.433	0.789	2	33	0.354	0	4	40	-187	3 号精磨	W1300	钢磨液	10	3 号精磨	W1300 和磨料刷	钢磨液	8+4
26	130	115	0.912	0.92	2	41	0.411	0	4	47	-148	3 号中磨	W1600	铝磨液	120	3 号中磨	W1600	铝磨液	120
27	135	32	0.221	0.856	2	32	0.206	1	4	40	-226	3 号中磨	X400	钢磨液	36	3 号中磨	X400、L60	钢磨液	8
28	135	32	0.221	0.856	2	32	0.206	1	4	40	-226	3 号中磨	X400	钢磨液	42	3 号中磨	X400、L60	钢磨液	8
29	764	179	1.577	0.95	2	33	0.907	1	4	44	-274	3 号中磨	W1300	钢磨液	32	3 号中磨	W900	钢磨液	20
30	240	56	0.839	1.36	1	33	0.345	1	3	41	-216	4 号中磨	X400、L60	钢磨液	20	4 号中磨	X400、L60	钢磨液	20

由表 4.46 可知，对上述 15 组测试案例的仿真研究中，采用第二种变权重 W3 的推理结果是：磨块有 14 个案例推理结果与实际案例结果一致，准确率为 93.3%。设备有 5 个案例推理结果与实际案例类型一致，准确率为 33.3%。磨液有 12 个案例推理结果与实际案例结果一致，准确率为 80%。时间有 6 个案例推理结果与实际案例结果一致，准确率为 40%。

表 4.47 第三组案例采用 W1 的仿真推理结果对比表

Tab. 4.47 The comparison table of simulation reasoning results adopting W1 of the third group cases

No.	A ₁ / mm	A ₂ / mm	A ₃ / μm	A ₄ / mm	A ₅	A ₆ / HRC	A ₇ / μm	A ₈	A ₉	A ₁₀ / HRC	A ₁₁ / MP	测试案例结果				采用 W1 的推理结果			
												磨块	设备	磨液	加工时间/min	磨块	设备	磨液	加工时间/min
31	118	26	0.85	1.397	1	36	0.651	0	4	45	-140	16 号中磨	X400	钢磨液	22	16 号中磨	X400	铝磨液	22
32	58	14	0.955	1.14	1	38	0.482	0	3	47	-246	24 目异形	X400	HYB	10	24 目异形	X400	HYB	12+6
33	113	19	0.627	0.84	2	48	0.283	0	4	53	-316	2 号精磨	X400	钢磨液	24	2 号精磨	W1600	钢磨液	20
34	47	40	0.268	0.88	2	33	0.136	1	4	44	-175	2 号精磨	X400	钢磨液	16	3 号三角	L05	钢磨液	20
35	230	33	0.947	0.65	2	39	0.432	1	4	49	-247	2 号中磨	X400	钢磨液	40	2 号中磨	LL05	钢磨液	30
36	60	38	0.168	0.732	1	61	0.088	0	3	68	-125	3P10 目黑 氧化铝	X1400	铝磨液	20	3P10 目黑 氧化铝	X1400	铝磨液	20
37	60	38	0.168	0.36	2	58	0.088	0	3	62	-192	3P10 目黑 氧化铝	X1400	钢磨液	20	3P10 目黑 氧化铝	X1400	铝磨液	20
38	340	70	2.846	0.92	1	49	0.851	1	3	58	-200	3 号粗磨	X400	钢磨液	16	3 号粗磨	W900、W1300	钢磨液	30+20
39	340	57	2.846	0.85	1	43	0.851	1	3	54	-215	3 号粗磨	X400	钢磨液	60	3 号粗磨 球	W900、W1300	钢磨液	30+20
40	340	109	2.846	0.58	1	45	0.851	1	3	55	-220	3 号粗磨	X400	钢磨液	60	3 号精磨	W900、W1300	钢磨液	30+20
41	440	140	2.641	1.17	2	31	2.571	1	4	43	-271	3 号粗磨	W1300	钢磨液	20	Φ1.5 钢球	瀑布机	钢磨液	30
42	500	51	0.247	0.78	2	48	0.081	0	4	57	-180	3 号精磨	W1300	钢磨液	20	3 号精磨	W900	钢磨液	20
43	45	10	0.454	0.89	1	31	0.354	1	3	43	-220	3 号精磨	X400	钢磨液	16	3 号中磨	L80	钢磨液	40
44	105	70	0.315	0.52	1	39	0.134	1	4	48	-154	3 号中磨	W1600	钢磨液	90	3 号中磨	W1600	钢磨液	90
45	45	10	0.4595	0.97	2	32	0.18	1	4	44	-210	3 号中磨	X400	钢磨液	16	3 号超精	X400	钢磨液	16

由表 4.47 可知, 对上述 15 组测试案例的仿真研究中, 采用等权重 W1 的推理结果是: 磨块有 10 个案例推理结果与实际案例结果一致, 准确度为 66.7%。设备有 6 个案例推理结果与实际案例类型一致, 准确率为 40%。磨液有 12 个案例推理结果与实际案例结果一致, 准确率为 80%。加工时间有 6 个案例推理结果与实际案例结果一致, 准确率为 40%。

表 4.48 第三组案例采用 W2 的仿真推理结果对比表

Tab. 4.48 The comparison table of simulation reasoning results adopting W2 of the third group cases

No.	A ₁ / mm	A ₂ / mm	A ₃ / μm	A ₄ / mm	A ₅	A ₆ / HRC	A ₇ / μm	A ₈	A ₉	A ₁₀ / HRC	A ₁₁ / MP	测试案例结果				采用 W2 的推理结果			
												磨块	设备	磨液	加工时间/min	磨块	设备	磨液	加工时间/min
31	118	26	0.85	1.397	1	36	0.651	0	4	45	-140	16 号中磨	X400	钢磨液	22	16 号中磨	X400	铝磨液	22
32	58	14	0.955	1.14	1	38	0.482	0	3	47	-246	24 目异形	X400	HYB	10	24 目异形	X400	HYB	12+6
33	113	19	0.627	0.84	2	48	0.283	0	4	53	-316	2 号精磨	X400	钢磨液	24	2 号精磨	W1600	钢磨液	20
34	47	40	0.268	0.88	2	33	0.136	1	4	44	-175	2 号精磨	X400	钢磨液	16	2 号精磨	L05	钢磨液	20
35	230	33	0.947	0.65	2	39	0.432	1	4	49	-247	2 号中磨	X400	钢磨液	40	2 号中磨	X400	钢磨液	40
36	60	38	0.168	0.732	1	61	0.088	0	3	68	-125	3P10 目黑 氧化铝	X1400	铝磨液	20	3P10 目黑氧 化铝	X1400	铝磨液	20
37	60	38	0.168	0.36	2	58	0.088	0	3	62	-192	3P10 目黑 氧化铝	X1400	钢磨液	20	3P10 目黑氧 化铝	X1400	铝磨液	20
38	340	70	2.846	0.92	1	49	0.851	1	3	58	-200	3 号粗磨	X400	钢磨液	16	3 号粗磨	W900、W1300	钢磨液	30+20
39	340	57	2.846	0.85	1	43	0.851	1	3	54	-215	3 号粗磨	X400	钢磨液	60	3 号粗磨	W900、W1300	钢磨液	30+20
40	340	109	2.846	0.58	1	45	0.851	1	3	55	-220	3 号粗磨	X400	钢磨液	60	3 号粗磨	W900、W1300	钢磨液	30+20
41	440	140	2.641	1.17	2	31	2.571	1	4	43	-271	3 号粗磨	W1300	钢磨液	20	3 号粗磨	X600	钢磨液	20
42	500	51	0.247	0.78	2	48	0.081	0	4	57	-180	3 号精磨	W1300	钢磨液	20	3 号精磨	W900	钢磨液	20
43	45	10	0.454	0.89	1	31	0.354	1	3	43	-220	3 号精磨	X400	钢磨液	16	3 号中磨	L80	钢磨液	40
44	105	70	0.315	0.52	1	39	0.134	1	4	48	-154	3 号中磨	W1600	钢磨液	90	3 号中磨	W1600	钢磨液	90
45	45	10	0.4595	0.97	2	32	0.18	1	4	44	-210	3 号中磨	X400	钢磨液	16	3 号超精磨	X400	钢磨液	16

由表 4.48 可知，对上述 15 组测试案例的仿真研究中，采用第一种变权重 W2 的推理结果是：磨块有 13 个案例推理结果与实际案例结果一致，准确度为 86.7%。设备有 7 个案例推理结果与实际案例类型一致，准确率为 46.7%。磨液有 13 个案例推理结果与实际案例结果一致，准确率为 86.7%。加工时间有 8 个案例推理结果与实际案例结果一致，准确率为 53.3%。

表 4.49 第三组案例采用 W3 的仿真推理结果对比表

Tab. 4.49 The comparison table of simulation reasoning results adopting W3 of the third group cases

No.	A ₁ / mm	A ₂ / mm	A ₃ / μm	A ₄ / mm	A ₅	A ₆ / HRC	A ₇ / μm	A ₈	A ₉	A ₁₀ / HRC	A ₁₁ / MP	磨块	测试案例结果			磨块	采用 W3 的推理结果		
													设备	磨液	加工时间/min		设备	磨液	加工时间/min
31	118	26	0.85	1.397	1	36	0.651	0	4	45	-140	16 号中磨	X400	钢磨液	22	16 号中磨	X400	铝磨液	6
32	58	14	0.955	1.14	1	38	0.482	0	3	47	-246	24 目异形	X400	HYB	10	24 目异形	X400	HYB	12+6
33	113	19	0.627	0.84	2	48	0.283	0	4	53	-316	2 号精磨	X400	钢磨液	24	2 号精磨	W1600	钢磨液	20
34	47	40	0.268	0.88	2	33	0.136	1	4	44	-175	2 号精磨	X400	钢磨液	16	2 号精磨	L05	钢磨液	20
35	230	33	0.947	0.65	2	39	0.432	1	4	49	-247	2 号中磨	X400	钢磨液	40	2 号中磨	X400	钢磨液	40
36	60	38	0.168	0.732	1	61	0.088	0	3	68	-125	3P10 目黑 氧化铝	X1400	铝磨液	20	3P10 目黑 氧化铝	X1400	铝磨液	20
37	60	38	0.168	0.36	2	58	0.088	0	3	62	-192	3P10 目黑 氧化铝	X1400	钢磨液	20	3P10 目黑 氧化铝	X1400	铝磨液	20
38	340	70	2.846	0.92	1	49	0.851	1	3	58	-200	3 号粗磨	X400	钢磨液	16	3 号粗磨	W900W1300	钢磨液	30+20
39	340	57	2.846	0.85	1	43	0.851	1	3	54	-215	3 号粗磨	X400	钢磨液	60	3 号粗磨	W900W1300	钢磨液	30+20
40	340	109	2.846	0.58	1	45	0.851	1	3	55	-220	3 号粗磨	X400	钢磨液	60	3 号粗磨	W900W1300	钢磨液	30+20
41	440	140	2.641	1.17	2	31	2.571	1	4	43	-271	3 号粗磨	W1300	钢磨液	20	3 号粗磨	X600	钢磨液	20
42	500	51	0.247	0.78	2	48	0.081	0	4	57	-180	3 号精磨	W1300	钢磨液	20	3 号精磨	W900	钢磨液	20
43	45	10	0.454	0.89	1	31	0.354	1	3	43	-220	3 号精磨	X400	钢磨液	16	3 号中磨	L80	钢磨液	40
44	105	70	0.315	0.52	1	39	0.134	1	4	48	-154	3 号中磨	W1600	钢磨液	90	3 号中磨	W1600	钢磨液	90
45	45	10	0.4595	0.97	2	32	0.18	1	4	44	-210	3 号中磨	X400	钢磨液	16	3 号超精	X400	钢磨液	16

由表 4.49 可知，对上述 15 组测试案例的仿真研究中，采用第二种变权重 W3 的推理结果是：磨块有 13 个案例推理结果与实际案例结果一致，准确度为 86.7%。设备有 7 个案例推理结果与实际案例类型一致，准确率为 46.7%。磨液有 13 个案例推理结果与实际案例结果一致，准确率为 86.7%。加工时间有 7 个案例推理结果与实际案例结果一致，准确率为 46.7%。

为了清晰看出不同情况下的准确率，将表 4.41 至表 4.49 汇总成表 4.50。

表 4.50 采用不同的特征权重对不同的测试案例组的仿真结果对比

Tab. 4.50 Different feature weights are used to compare the simulation results of different test case groups

权重	组别	磨块准确率	设备准确率	磨液准确率	加工时间准确率
W1	第一组	66.7%	20%	80%	26.7%
W1	第二组	66.7%	40%	73.3%	53.3%
W1	第三组	66.7%	40%	80%	40%
W2	第一组	93.3%	26.7%	80%	33.3%
W2	第二组	93.3%	33.3%	73.3%	40%
W2	第三组	86.7%	46.7%	86.7%	53.3%
W3	第一组	100%	33.3%	86.7%	33.3%
W3	第二组	93.3%	33.3%	80%	40%
W3	第三组	86.7%	46.7%	86.7%	46.7%

由表 4.50 可知：

- 1) 等权重推理无法得到合理的工艺参数，需要给各案例特征赋予不同的权重；
- 2) 对不同的加工工艺参数建立规则时，需要根据对其影响程度最大的案例特征，进行分级建规则：

① 磨块的准确率较高：说明“加工前/后粗糙度比和加工前粗糙度”是影响磨块选择的主要因素，在建其规则时，可依据“加工前/后粗糙度比和加工前粗糙度”进行分级；

② 磨液的准确率也较高：主要是因为现有案例中所用到的磨液种类很少，只有 10 种，磨液的适用面比较广。

③ 设备的准确率较低。分析原因主要是影响改参数选择的主要因素不是“加工前/后粗糙度比和加工前粗糙度”，而应该参考在实际加工中主要根据零件尺寸进行设备选择，因此，建其规则及推理时需要重点考虑零件尺寸。

④ 加工时间的准确率较低。分析原因主要是设备的错误选择导致。

为此，本文采取了以下改进措施：1) 在选择不同的加工参数时调整特征权重；2) 调整建规则的分级依据：虽然 4 个工艺参数的规则构建方法都是“分类分级法”，但是由于影响 4 个工艺参数的主要案例特征有所不同，故需要建立各自的优选规则，例如：依据“加工后/前粗糙度比 G 和加工前粗糙度”对磨块进行分级建规则、而依据“零件尺寸”对设备进行分级建规则。

① 改变各工艺参数构建规则时的分类依据，并且合理选择不同工艺参数推理时的特征权重。

② 采用表 4.43 中的测试案例进行仿真，共激活 24 条规则，由于规则相似度非常接近，所以需根据式 (4-19) 至式 (4-21) 进行综合评判，得出最终结果，如表 4.51 所示。

表 4.51 采用不同的建规则依据和特征权重对第一组测试案例的仿真结果

Tab. 4.51 The simulation results of the first group of test cases obtained by using different construction rules and feature weights

No.	A ₁ / mm	A ₂ / mm	A ₃ / μm	A ₄ / mm	A ₅	A ₆ / HRC	A ₇ / μm	A ₈	A ₉	A ₁₀ / HRC	A ₁₁ / MP	磨块	测试案例结果			采用 W3 的推理结果			
													设备	磨液	加工时间/min	磨块	设备	磨液	加工时间/min
1	300	106	0.51	1.73	2	39	0.433	1	4	48	-154	16 号中磨	X400	钢磨液	16	16 号中磨	X400	钢磨液	16
2	175	35	0.236	0.74	2	30	0.095	1	4	42	-234	2 号精磨	X400	钢磨液	12	2 号精磨	X400	钢磨液	24
3	47	40	0.268	0.88	2	33	0.136	1	4	44	-175	2 号精磨	X400	钢磨液	16	2 号精磨	X400	钢磨液	24
4	92	39	0.25	0.99	2	43	0.134	1	3	51	-207	2 号中磨	X400	钢磨液	16	2 号中磨	X400	钢磨液	16
5	595	60	0.3305	0.7	1	32	0.143	1	3	39	-212	3 号超精磨	W1300	钢磨液	16	3 号超精磨	X400	钢磨液	16
6	270	38	0.73	0.79	2	33	0.351	1	4	42	-271	3 号超精磨	X400	钢磨液	16	3 号超精磨	X400	钢磨液	16
7	340	70	2.846	0.92	1	49	0.851	1	3	58	-200	3 号粗磨	X400	钢磨液	16	3 号粗磨	X400	铝磨液	60
8	370	42	0.211	1.023	1	31	0.175	1	4	42	-206	3 号粗磨	W1300	钢磨液	30	3 号粗磨	W1300	钢磨液	10
9	163	45	0.606	0.956	1	40	0.573	1	3	50	-158	3 号粗磨	X400	钢磨液	6	3 号粗磨	X400	铝磨液	60
10	500	51	0.247	0.78	2	48	0.081	0	4	57	-180	3 号精磨	W1300	钢磨液	20	3 号精磨	W1300	铝磨液	20
11	60	16	0.265	0.93	2	32	0.083	0	4	46	-273	3 号精磨	L80	钢磨液	20	3 号精磨	L80、L05	钢磨液	50
12	104	13	0.786	0.7	1	38	0.236	1	3	46	-200	3 号精磨	X400	铝磨液	16	3 号精磨	X400	铝磨液	16
13	564	90.5	1.577	0.59	1	43	0.776	0	4	48	-170	3 号中磨	W1300	钢磨液	92	3 号中磨	X400	铝磨液	16
14	82	17	2.145	0.73	1	32	0.965	1	2	41	-223	5 号粗磨	LL05	钢磨液	10	5 号粗磨	LL05	钢磨液	10
15	292	103	2.439	1.4	1	41	1.342	1	3	51	-210	斜三角 2*2	X400	钢磨液	20+10	斜三角 2*2	X400	钢磨液	5

由表 4.51 可知,对上述 15 组测试案例的仿真研究中,首先改变了各工艺参数建规则时的分类依据,然后不同工艺参数推理时选择了不同的特征权重,其推理结果是:磨块有 15 个案例推理结果与实际案例结果一致,准确率为 100%。设备有 12 个案例推理结果与实际案例类型一致,准确率为 80%。与表 4.43 相比准确率明显上升。磨液有 12 个案例推理结果与实际案例结果一致,准确率为 80%。加工时间有 7 个案例推理结果与实际案例结果一致,准确率为 46.7%。

采用表 4.41 至表 4.49 中的三组测试案例进行仿真：

方式 1：全部参数都采用同一种建规则时的分类依据，并且推理时的特征权重也相同；

方式 2：首先改变各工艺参数建规则时的分类依据，然后不同工艺参数推理时选择不同的特征权重。

得到的最终的仿真结果如表 4.52 所示。

表 4.52 采用不同的建规则依据和特征权重对不同的测试案例组的仿真结果对比

Tab. 4.52 The simulation results of different testing case groups by using different rule basis and feature weights

权重设置	组别	磨块准确率	设备准确率	磨液准确率	加工时间准确率
方式 1	第一组	100%	33.3%	86.7%	33.3%
	第二组	93.3%	33.3%	80%	40%
	第三组	86.7%	46.7%	86.7%	46.7%
方式 2	第一组	100%	80%	80%	46.7%
	第二组	93.3%	86.7%	66.7%	33.3%
	第三组	86.7%	80%	60%	60%

由表 4.52 可知：通过调整特征权重，并改变设备建规则的分级依据，可以有效提升设备优选的正确率。

4.4 本章小结

为了实现滚磨光整加工中工艺方案的快速、准确地智能优选，充分利用已经积累的大量成功生产实例，提出一种分级递进的融合决策理论。依据加工工艺数据库构建工艺案例库，首先采用加权案例推理技术（WCBR），寻找与新问题匹配的原有案例，以便快速找到问题的解；如果没有找到匹配案例，则需要借助模糊专家系统（FES），充分挖掘已有案例中的知识，通过区间值模糊推理，寻找新问题的相似案例。

（1）本章提出了变权重案例推理方法，并建立了滚磨光整加工工艺的优选模型，着重讨论了该方法中相关参数的确定问题。采用已有的成功案例进行大量的仿真研究，结果表明：该方法实现简单，易于应用。但是该方法必须按照给定的各参数值进行严格匹配，可能会出现案例库中没有相似案例或者相似度较低的情况。

（2）当没有检索到匹配案例时，提出了基于专家推理的滚磨光整加工工艺优选模型，以滚抛磨块为例详细阐述了区间值模糊规则的构建：首先根据实际加工的成功案例确定各特征值等级范围及隶属区间，并与滚抛磨块参数建立联系，利用产生式规则表示

法建立区间值模糊规则；然后通过层次分析法确定模糊规则中各特征属性的权重，并采用区间值模糊推理算法进行滚抛磨块参数优选推理机的设计。最后，采用大量的测试案例进行了实验仿真，结果表明：基于专家推理的优选模型能够在案例推理的基础上提升了新问题与旧案例之间的相似度，实现了在满足加工要求的同时，能够快速、准确、合理地优选出待加工零件所需的滚磨光整加工工艺。由于专家推理的知识库建立过程复杂，需要不断积累和更新知识。

综上所述，案例推理和专家推理的递进融合推理模式，适应于当前滚磨光整加工行业的生产现状，在实际加工过程中能够优势互补，发挥出良好的应用效果。同时随着大量生产实例的规范入库，案例库不断完善，专家知识也能持续传播和积累，使得滚磨光整加工工艺优选的准确度能够逐步提高。