

# 基于模糊聚类和案例推理的滚抛磨块优选模型

杨炎<sup>1a</sup>, 高炜<sup>1b</sup>, 杨胜强<sup>1b</sup>, 田建艳<sup>1a</sup>, 高云松<sup>2</sup>

(1.太原理工大学 a.电气与动力工程学院 b.机械与运载工程学院, 太原 030024;  
2.廊坊市北方天宇机电技术有限公司, 河北 廊坊 065000)

**摘要:** **目的** 实现滚磨光整加工工艺制定过程中滚抛磨块快速、准确地优选。**方法** 在分析滚磨光整加工工艺特点的基础上, 根据滚抛磨块优选的 E-R 图构建案例库, 建立基于案例推理的滚抛磨块优选模型。针对不同案例特征属性的数据类型, 选择合适的特征属性相似度计算方法; 通过层次分析法确定案例特征属性的权重, 采用加权最近邻居法计算案例间的综合相似度, 并通过案例处理获得新问题的优选磨块。采用模糊 C 均值聚类算法对案例库中的冗余案例进行处理, 实现案例库的动态优化。最后, 采用实际的不同零件类型的不同数据进行仿真。**结果** 大量仿真结果表明, 采用模糊 C 均值聚类算法, 处理案例库中的冗余案例, 可以有效提高案例推理的检索效率和精度; 针对实际的新问题, 基于模型并通过案例检索、修正, 可以从案例库中快速提取出新问题的相似案例, 验证了模型的可行性和有效性, 重要的是能够为新问题的磨块优选提供决策指导。**结论** 基于模糊聚类的案例推理技术可以用于滚磨光整加工工艺实施时的滚抛磨块优选。

**关键词:** 案例推理; 模糊 C 均值聚类; E-R 图; 滚磨光整加工; 滚抛磨块优选

中图分类号: TG356.28 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2019)09-0315-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.09.038

## Optimal Model of Abrasive Blocks Based on Fuzzy Clustering and Case-based Reasoning

YANG Yan<sup>1a</sup>, GAO Wei<sup>1b</sup>, YANG Sheng-qiang<sup>1b</sup>, TIAN Jian-yan<sup>1a</sup>, GAO Yun-song<sup>2</sup>

(1.a.School of Electrical and Power Engineering, b.School of Machinery and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2.North Tianyu Electromechanical Technology Co., Ltd, Langfang 065000, China)

**ABSTRACT:** The work aims to achieve fast and accurate optimization of the abrasive blocks during formulation of the barrel finishing process. Based on the analysis of the characteristics of the barrel finishing process, the case base was constructed according to the E-R diagram of the optimization of the abrasive blocks, and the optimal model of the abrasive blocks based on case-based reasoning was established. According to the data types of different case feature attributes, the appropriate feature attribute similarity calculation method was selected. The weight of case feature attribute was determined by the analytic hierarchy process, and the weighted nearest neighbor method was used to calculate the comprehensive similarity between cases. The optimal abrasive block of new problem was obtained by case processing. The fuzzy C-means clustering algorithm was used

收稿日期: 2018-11-16; 修订日期: 2019-02-23

Received: 2018-11-16; Revised: 2019-02-23

基金项目: 山西省回国留学人员科研资助项目 (2017-032); 山西省自然科学基金重点项目 (201801D111002); 国家自然科学基金 (U1510118) Fund: Supported by Shanxi Scholarship Council of China (2017-032), the Key Project of Natural Science Foundation of Shanxi Province of China (201801D111002), National Natural Science Foundation of China (U1510118)

作者简介: 杨炎 (1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为复杂系统建模与智能控制。

Biography: YANG Yan (1992—), Male, Master, Research focus: complex system modeling and intelligent control.

通讯作者: 田建艳 (1966—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为复杂系统建模与智能监控系统研究。邮箱: tut\_tianjy@163.com

Corresponding author: TIAN Jian-yan (1966—), Female, Doctor, Professor, Research focus: research on complex system modeling and intelligent monitoring system. E-mail: tut\_tianjy@163.com

to deal with redundant cases to realize the dynamic optimization of the case base. Finally, different data of different parts types were used for simulation. The results of a large number of simulation studies demonstrated that the fuzzy C-means clustering algorithm could be used to deal with the redundant cases in the case base, which could effectively improve the retrieval efficiency and accuracy of case-based reasoning. For the actual new problems, based on the model and through case retrieval and correction, similar cases of new problem were quickly extracted from the case base, thus verifying the feasibility and effectiveness of the model. It was important to provide decision guidance for the optimization of the abrasive blocks of the new problem. The case-based reasoning technique based on fuzzy clustering can be used to optimize the abrasive blocks during the implementation of the barrel finishing process.

**KEY WORDS:** case-based reasoning; Fuzzy C-means clustering; E-R diagram; barrel finishing; optimization of the abrasive blocks

滚磨光整加工主要通过磨块和工件在滚筒内的复杂相对运动对工件表面进行碰撞、滚压及磨削,达到改善零件使用性能的目的<sup>[1]</sup>。在滚磨光整加工工艺推广应用,磨块是影响加工效果和加工效率的关键因素<sup>[2-4]</sup>,但针对磨块优选的研究较少。目前实际加工中,磨块的选择过分依赖于专家经验,且影响磨块优选的因素众多,伴随着大量复杂的推理过程,将导致以下问题:推理过程需要依靠操作者大量的试验完成,效率不高;专家的经验知识不能及时地得到积累。

案例推理(Case-based reasoning, CBR)是人工智能领域中较新的建模方法,它把特定领域的知识以案例形式存储在案例库中,然后比较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。CBR具有求解问题简单、快速和高效等优点,得到了很多学者的关注。邱华东等<sup>[5]</sup>针对小批量钢种在采用神经网络修正参数时不能满足模型精度的问题,采用案例推理技术来确定小钢种轧制时的参数修正系数,提高了模型的控制精度。Daniel Brown等<sup>[6]</sup>为了控制糖尿病人的最佳血糖含量,运用案例推理技术建立了胰岛素推量计算模型,降低了血糖的风险指数。李晓明等<sup>[7]</sup>运用案例推理建立航天发动机故障诊断模型,提高了故障维修效率。刘海江等<sup>[8]</sup>为了查找航天大型薄壁件缺陷的原因,采用案例推理技术建立了质量追溯模型,提高了车间质量管理水平。以上研究解决了各自领域中规则不易获取、模型建立困难的问题。

目前滚磨光整加工中,已经保存了大量的以传统纸质实验文件或电子文档为数据的成功案例,因此急需研究一种基于案例推理技术的滚抛磨块优选模型,从而实现滚磨光整加工工艺制定过程中滚抛磨块的快速、准确优选。

## 1 基于案例推理的滚抛磨块优选

通常, CBR 由 4 个基本过程组成:检索(Retrieve)、应用(Reuse)、修正(Revise)、保存(Retain),即 4R。在应用时,首先根据新问题进行特征描述,然后通过检索查找案例库中是否存在相似案例。如果存在相似案例,则直接应用该案例的解,否则通过案例修正获

得问题的解决方案。经过案例评价后,将合格的案例存入案例库。基于模糊聚类案例推理的滚抛磨块优选原理框图如图 1 所示。

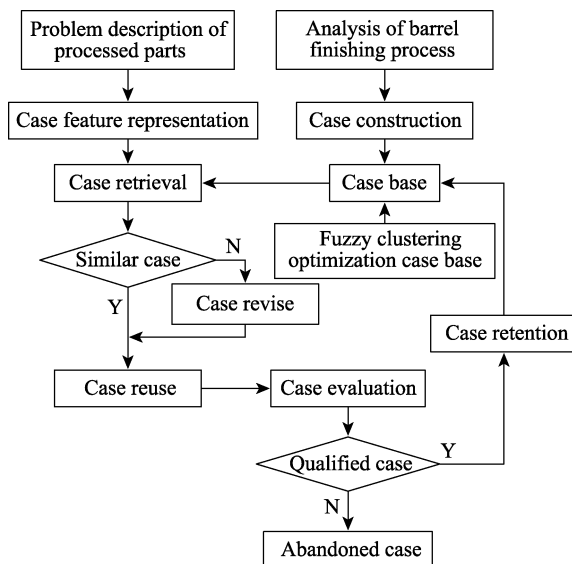


图 1 基于模糊聚类案例推理的滚抛磨块优选原理框图  
Fig.1 Diagram of the abrasive blocks optimization based on fuzzy clustering and case-based reasoning

由图 1 可知,滚抛磨块的优选流程如下:首先分析滚磨光整加工的工艺特点,根据滚抛磨块优选 E-R 图选取特征建立案例库,得到待加工零件的问题描述(零件特征、加工要求),然后进行案例检索,提取相似案例实现案例应用。如果没有相似案例,则通过案例修正,得到新问题的解决方案。最后采用优选出的磨块对零件加工,若达到加工要求,将该案例存入案例库;否则,为废弃案例。为了降低案例库的容量,提高案例的检索精度和速度,采用模糊聚类算法优化案例库。

### 1.1 案例特征表示

实体类型、属性和联系常用 E-R 图(Entity Relationship Diagram)来描述。通过深入研究滚磨光整加工的工艺过程,结合实际生产数据及加工实验报告,分析加工案例的信息描述,得到磨块选择的影响

因素主要有零件特征和加工要求。滚抛磨块优选 E-R 图如图 2 所示。

根据实验报告、工厂实际生产数据和文献手册数据，被加工零件的表面技术状态主要有加工前特征，如粗糙度、光亮度、毛刺、硬度等；加工要求主要是加工后特征，如

粗糙度、光亮度、毛刺、残余应力、硬度等；磨块指标主要有磨块材质、几何形状、尺寸等。其中，案例特征属性是零件特征和加工要求，案例的解是磨块特征。由于不同类型零件的尺寸参数不同，在案例构建时，按照零件类型构建案例库。滚抛磨块优选案例结构如表 1 所示。

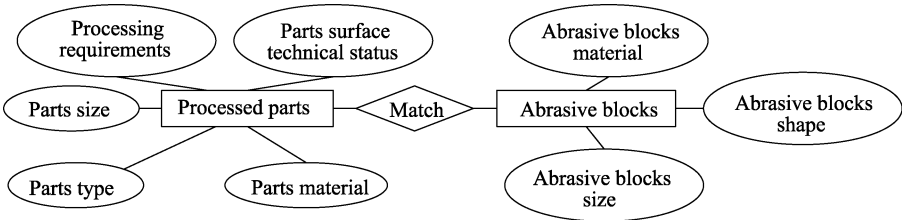


图 2 滚抛磨块优选 E-R 图  
Fig.2 E-R diagram of the abrasive blocks optimization

表 1 滚抛磨块优选案例结构	
Tab.1 Case structure of the abrasive blocks optimization	
Case feature attributes	Type
	Material
	Size
	Roughness
	Brightness
	Burr
	Hardness
	Roughness
	Brightness
	Burr
	Hardness
	Residual stress
	Abrasive blocks material
	Abrasive blocks shape
	Abrasive blocks size

1.2 案例检索

根据零件加工案例的特征属性，案例检索步骤如下：

1) 案例检索时，先由零件类型检索出对应的案例库，再通过零件材质检索出对应案例库中相同材质的案例集作为新问题的待选案例集，采用计算相似度的方法在待选案例集中检索相似案例。

2) 相似度计算采用加权最近邻法<sup>[9-12]</sup>，公式为：

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

式中：SIM(T,S)为两案例的相似度；T 为新问题；S 为案例库中的案例；T<sub>i</sub> 为新问题的第 i 个特征属性的值；S<sub>i</sub> 为案例库中对应特征属性的值；n 为特征属性的个数；sim(T<sub>i</sub>,S<sub>i</sub>)为 T 和 S 的第 i 个特征属性的相似度；w<sub>i</sub> 为第 i 个特征属性的权值，本文应用层次分

析法确定 w<sub>i</sub>。

1.2.1 特征属性相似度计算

根据滚磨光整加工数据中的案例描述信息，可将案例特征属性的数据类型分为三类：数值型、模糊逻辑型、无关型<sup>[13-14]</sup>。其相似度计算方式如下所述。

1) 数值型特征属性的相似度计算公式为：

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

$$\sigma_i = \sigma \times (i_{max} - i_{min}) \tag{3}$$

式中：d(T<sub>i</sub>,S<sub>i</sub>)为两特征属性的绝对值距离；σ<sub>i</sub> 为挠曲点；i<sub>max</sub>、i<sub>min</sub> 分别为第 i 个特征属性的最大值与最小值；σ 为常数，取值范围为[0,1]。

零件尺寸、硬度、加工前表面粗糙度、加工后表面粗糙度、加工前毛刺、残余应力都是数值型数据，采用公式（2）和（3）计算其相似度。其中，毛刺可通过高度 H 或厚度 B 来表征<sup>[15]</sup>，可以通过仪器测量毛刺的尺寸指标将毛刺数值化，ZhengQiao<sup>[16]</sup>采用触针轮廓仪测量微型 V 形槽的毛刺高度。

2) 模糊逻辑型特征属性的相似度计算公式为：

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

式中：M 为特征属性的最大取值。

根据光亮度的国家标准，光亮度有可辩加工痕迹方向、没有光亮度、较低且没有磨纹、光亮度非常高 4 种等级，分别赋值 1、2、3、4，可采用公式（4）计算其相似度，此处 M=4。

3) 无关型特征属性相似度的计算公式为：

$$sim(T_i,S_i) = \begin{cases} 1, & T_i = S_i \\ 0, & T_i \neq S_i \end{cases} \tag{5}$$

通常“加工要求”中的“毛刺”参数常用“有”或“无”来描述，采用公式（5）计算其相似度。

1.2.2 案例特征属性权重确定

本文采用层次分析法确定特征属性的权重，通过

专家意见和分析实际加工的数据,得到各特征属性的相对重要性。以齿轮类零件为例,其特征属性层次结构模型如图3所示。在层次结构的基础上,通过构造判断矩阵、计算单层权重向量及其一致性检验、计算综合权重向量及其一致性检验,最终得到总权重  $w_i = \{0.0267, 0.0485, 0.0882, 0.2475, 0.1645, 0.0773, 0.0504, 0.1223, 0.0847, 0.0436, 0.0283, 0.0180\}$ 。

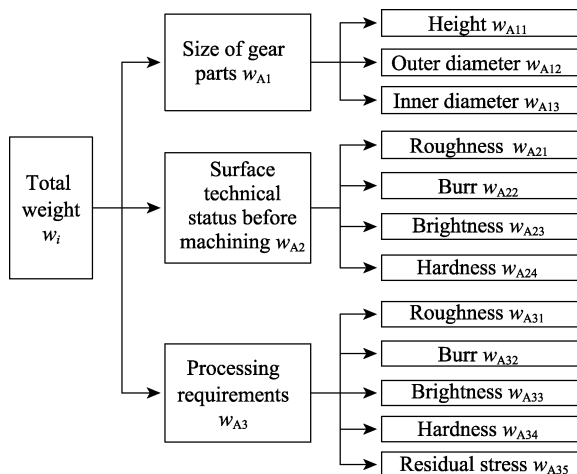


图3 齿轮类零件的特征属性层次结构模型  
Fig.3 Feature attribute hierarchy model of gear parts

### 1.3 案例处理

案例处理包含案例修正、案例应用和保存。根据公式(1)计算相似度,将相似度大于阈值  $S_{th}$  的案例作为相似案例,阈值由专家根据加工经验给定。若相似案例存在,则结果有以下两种:①相似案例唯一,则直接应用该案例的磨块;②相似案例有多个,则由专家分析决策,选定滚抛磨块。

如果不能检索到与新问题相似的案例,则需案例修正。本文根据特征属性的重要度,选择权重大于  $w_{th}$  的特征属性,由公式(2)计算相似度,若相似度最高的案例的相似度大于  $S_{th}$ ,则将该案例的解作为新问题的解决方案;否则由专家分析决策,选定滚抛磨块。

通过案例检索、案例修正和案例应用优选出新零件的加工磨块后,需对案例进行评价才能判断该案例是否能存入案例库。本次评价采用“加工效果后评价”的方法:首先将优选出的磨块应用于新零件的加工,若零件的加工效果达到要求,则将该案例存入案例库,否则为废弃案例。

## 2 基于模糊聚类的滚抛磨块案例库优化

随着案例库的不断更新,案例库中会出现冗余案例,并会影响案例的检索精度和速度<sup>[17]</sup>,因此有必要对案例库进行优化。针对上述问题,采用模糊C均值

(Fuzzy C-Means, FCM)聚类算法解决案例库中案例的冗余问题。

### 2.1 FCM 算法的原理

FCM 聚类算法是模糊聚类的基本方法之一,样本点的类属由隶属度确定,其聚类准则是将目标函数最小化,FCM 原理如下<sup>[18]</sup>。

定义案例库  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_M\}$ , 其中  $C_i = \{C_{i1}, C_{i2}, \dots, C_{in}\}$ ,  $C_i$  为滚抛磨块优选案例库中的第  $i$  个案例;  $M$  为案例个数;  $n$  代表每个案例的特征属性个数。目标函数的计算式为:

$$J(C, R, v_1, v_2, \dots, v_k, \dots, v_c) = \sum_{k=1}^c \sum_{i=1}^M r_{ki}^{m_0} d_{ki}^2 \quad (6)$$

目标函数的约束条件为:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^c r_{ki} = 1, & 1 \leq i \leq M \\ r_{ki} \in [0, 1], & 1 \leq k \leq c, 1 \leq i \leq M \\ \sum_{i=1}^M r_{ki} \in [0, M], & 1 \leq k \leq c \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $r_{ki}$  表示第  $i$  ( $i=1, 2, \dots, M$ ) 个案例属于第  $k$  ( $k=1, 2, \dots, c$ ) 个类的程度;  $R$  为  $r_{ki}$  构成的隶属度矩阵;  $v_k$  为第  $k$  个聚类中心;  $d_{ki}$  为  $v_k$  与  $C_i$  之间的欧氏距离,计算式为  $d_{ki} = \|v_k - C_i\|$ ;  $m_0$  为模糊参数,通常  $m_0=2$ 。

采用拉格朗日乘子求最优解,当  $d_{ki}=0$  时,  $r_{ki}=1$ ,  $r_{ji}=0$ ,  $j=1, 2, 3, \dots, c$  ( $k \neq j$ )。当  $d_{ki} \neq 0$  时可以得到:

$$r_{ki} = \frac{1}{\sum_{j=1}^c \left( \frac{d_{ki}}{d_{ji}} \right)^{\frac{2}{m_0-1}}} \quad (8)$$

$$v_k = \frac{\sum_{i=1}^M (r_{ki})^{m_0} C_i}{\sum_{i=1}^M (r_{ki})^{m_0}} \quad (9)$$

在给定  $c$ 、 $m_0$  和最大迭代次数等参数后,由公式(8)和(9)迭代即可完成案例库数据的聚类过程。

### 2.2 FCM 优化滚抛磨块案例库

案例库中的案例都是经过实际加工检验合格后的数据,其中存在某些特殊的零件,此类零件的加工数据称为特殊案例,故在剔除冗余案例时,需要先将特殊案例保存,FCM 聚类算法优化案例库的步骤如下:

1) 利用 FCM 聚类算法对案例库中的案例进行聚类处理,聚类数定为滚抛磨块的类别数,收敛精度  $\varepsilon=10^{-5}$ ,最大迭代次数为  $T=100$ ,模糊指数  $m_0=2$ ,初始化聚类中心  $V_0$ 。

2) 根据公式(8)计算初始隶属度矩阵  $R_0$ ,并通过公式(6)计算初始的目标函数  $J_0$ 。

3) 通过公式(8)和(9)更新聚类中心  $V$  和隶

属度矩阵  $R$ 。

4) 通过公式 (6) 更新目标函数  $J$ , 若目标函数的变化量小于  $\varepsilon$  或者迭代次数大于  $T$ , 算法结束; 否则, 转步骤 (3)。

5) 聚类结束后, 若案例属于每一类的隶属度都小于隶属度阈值  $u_{th}$ , 则将该案例保存, 组成的案例集为  $D_1$ ; 通过对特殊案例的大量仿真研究, 本文隶属度阈值  $u_{th}=0.3$ 。

6) 在剩余案例中, 从每个聚类集中按 80% 的比例随机抽取案例, 组成案例集  $D_2$ 。

7) 将  $D_1$  和  $D_2$  组成新的案例库, 得到精简案例库。

3 实验仿真及结果分析

采用工厂齿轮类、轴类和叶片类零件的实际数据进行了大量的仿真研究。每类零件仿真时, 采用案例库中“已有的案例”、“相似的案例”和“差异较大零件的案例”三种情况分别做仿真。由于篇幅所限, 仅给出齿轮类的仿真结果。根据专家经验, 齿轮类零件相似度阈值  $S_{th}$  为 0.7。

案例库中的齿轮类零件参数分别为: 材质编号 (M)、高 ( $H$ )、外直径 ( $O$ )、内直径 ( $I$ )、加工前表面粗糙度 ( $Ra_1$ )、加工前毛刺 ( $B_1$ )、加工前光亮度 ( $B_{r1}$ )、加工前硬度 ( $H_1$ )、加工后表面粗糙度 ( $Ra_2$ )、残余应力 ( $R_s$ )、加工后光亮度 ( $B_{r2}$ )、加工后硬度 ( $H_2$ )、加工后毛刺 ( $B_2$ )、磨块。下文各表中最后一列均为测试案例与案例库中案例之间的相似度。

3.1 FCM 聚类优化案例库

采用 2.2 中的方法对齿轮类零件的案例进行聚类, 目标函数值变化曲线如图 4 所示。从图 4 中可以

看出, 采用 FCM 聚类算法对齿轮类零件聚类时, 在第 6 次迭代后目标函数取得最小值, 具有较好的收敛性。剔除冗余案例后, 案例库的案例数量是原案例库的 80%~85%, 大幅减少了案例的数量, 提高了案例检索的效率。

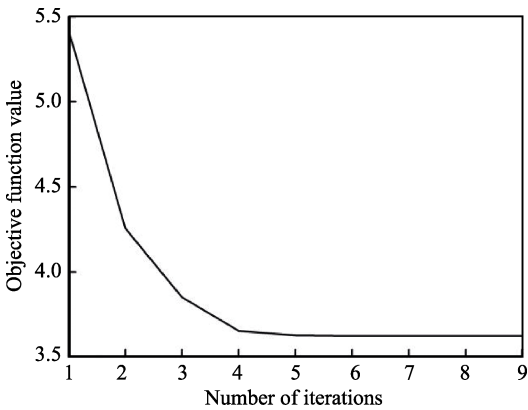


图 4 目标函数值变化曲线  
Fig.4 Curves of objective function

3.2 案例库中已有案例的仿真

选择案例库中已有案例进行测试, 以编号为 10 的某厂的齿轮作为测试案例, 仿真结果如表 2 所示。

由表 2 可知, 齿轮类零件中, 新问题的信息若和案例库中某条案例的参数信息一致, 则其相似度为 1, 可以直接应用该案例中的磨块来加工新零件。

3.3 相似案例的仿真

选择案例库中与某些案例相似的案例进行测试, 以编号为 13 的某厂齿轮作为测试案例, 仿真结果如表 3 所示。

表 2 齿轮类已有案例的仿真结果  
Tab.2 Simulation result of existing case in gears

No.	M	$H$ /mm	$O$ /mm	$I$ /mm	$Ra_1$ / $\mu\text{m}$	$B_1$ /mm	$B_{r1}$	$H_1$ (HV)	$Ra_2$ / $\mu\text{m}$	$R_s$ /MPa	$B_{r2}$	$H_2$ (HV)	$B_2$	Abrasive blocks	Similarity
10	Alloy steel	83	206	100	0.618	1.9	1	50	0.515	-250	4	55	Inexistence	3# rounghing	1.000
18	Alloy steel	64	200	80	0.594	1.873	1	48	0.487	-245	4	52	Inexistence	3# rounghing	0.762

表 3 齿轮类相似案例的仿真结果  
Tab.3 Simulation result of similar case of gears

No.	M	$H$ /mm	$O$ /mm	$I$ /mm	$Ra_1$ / $\mu\text{m}$	$B_1$ /mm	$B_{r1}$	$H_1$ (HV)	$Ra_2$ / $\mu\text{m}$	$R_s$ /MPa	$B_{r2}$	$H_2$ /HV	$B_2$	Abrasive blocks	Similarity
13	20CrMnTiH	42	109	44	0.376	1.380	1	48	0.355	-215	4	53	Inexistence	2# triangle	
4	20CrMnTiH	42	116	44	0.384	1.380	1	48	0.379	-210	4	55	Inexistence	2# triangle	0.819
5	20CrMnTiH	66	128	46	0.368	1.397	1	48	0.357	-205	4	52	Inexistence	2# triangle	0.736
7	20CrMnTiH	39	87	43	0.389	1.400	2	50	0.368	-225	4	57	Inexistence	2# triangle	0.634

由表 3 可知, 齿轮类零件中, 新问题的信息若和案例库中某些案例的信息相似度较高, 则通过计算案例之间的相似度可以检索出大于阈值的相似案例, 检索出的相似案例中的磨块的信息和测试案例磨块的信息一致, 可应用优选出的磨块加工新零件。

### 3.4 差异较大零件案例的仿真

选择与案例库中所有案例差异较大的案例进行

测试, 以编号为 16 的某厂齿轮作为测试案例, 结果如表 4 所示。

由表 4 可知, 齿轮类零件中, 新问题的信息若和案例库中所有案例信息的差异较大, 则它们的相似度较小, 无法达到阈值  $S_{th}$ , 此时需要通过案例修正为新问题找到可用的磨块。本文案例修正时,  $w_{th}=0.1$ , 修正所用的特征属性为: 加工前粗糙度、加工后粗糙度、加工前毛刺。修正后的结果如表 5 所示。

表 4 齿轮类差异较大零件案例的仿真结果  
Tab.4 Simulation result of gearcases with large difference

No.	M	$H$ /mm	$O$ /mm	$I$ /mm	$Ra_1$ / $\mu m$	$B_1$ /mm	$B_{r1}$	$H_1$ (HV)	$Ra_2$ / $\mu m$	$R_s$ /MPa	$B_{r2}$	$H_2$ (HV)	$B_2$	Abrasive blocks	Similarity
16	Cast steel	5	32	13	0.565	1.8	3	47	0.351	-240	4	51	Inexistence	3# rounghing	
12	Cast steel	8	36	12	0.196	1.534	2	45	0.115	-260	4	53	Inexistence	3# rounghing	0.489
8	Cast steel	48	135	54	0.66	1.9	1	55	0.464	-255	4	63	Inexistence	3# rounghing	0.467
14	Cast steel	4.5	34	14	0.196	1.42	2	45	0.115	-270	4	53	Inexistence	2# triangle	0.435

表 5 齿轮类差异较大案例修正的仿真结果  
Tab.5 Simulation result of case correction of gears with large difference

No.	M	$H$ /mm	$O$ /mm	$I$ /mm	$Ra_1$ / $\mu m$	$B_1$ /mm	$B_{r1}$	$H_1$ (HV)	$Ra_2$ / $\mu m$	$R_s$ /MPa	$B_{r2}$	$H_2$ (HV)	$B_2$	Abrasive blocks	Similarity
16	Cast steel	5	32	13	0.565	1.8	3	47	0.351	-240	4	51	Inexistence	3# rounghing	
8	Cast steel	48	135	54	0.66	1.9	1	55	0.464	-255	4	63	Inexistence	3# rounghing	0.732

由表 5 可知, 差异较大的案例在经过案例修正后, 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, 该相似案例的磨块和测试案例的磨块的信息相同, 可以对新零件加工。

## 4 结论

为了实现滚磨光整加工中滚抛磨块的智能优选, 本文采用模糊 C 均值聚类 and 案例推理建立了滚抛磨块优选模型, 该方法实现简单, 易于应用。采用实际加工的零件数据进行验证, 该方法在满足加工要求的同时, 能够快速、准确地优选出待加工零件所需的磨块。案例推理是滚抛磨块优选比较适合的方法, 并且随着案例库的不断完善, 专家知识也在传播和积累, 磨块优选的准确度也在不断提升。但是, 由于滚磨光整加工工艺流程繁杂, 影响磨块优选的因素众多, 后续工作还需对磨块优选的参数进行优化, 进一步完善案例库的构建。

### 参考文献:

- [1] 张晓东, 李秀红, 李文辉, 等. 离心式滚磨光整加工钛合金的数值模拟分析[J]. 表面技术, 2014, 43(5): 11-15.  
ZHANG Xiao-dong, LI Xiu-hong, LI Wen-hui, et al. Numerical simulation analysis of the centrifugal roll finishing of titanium alloy[J]. Surface technology, 2014,

- 43(5): 11-15.
- [2] MEDIRATTA R, AHLUWALIA K, YEO S H. State-of-the-art on vibratory finishing in the aviation industry: an industrial and academic perspective[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2016, 85(1-4): 415-429.
- [3] YANG Sheng-qiang, LI Wen-hui. Surface finishing theory and new technology[M]. Berlin: Springer press, 2018.
- [4] HASHIMOTO F, YAMAGUCHI H, KRAJNICK P, et al. Abrasive fine-finishing technology[J]. CIRP annals-manufacturing technology, 2016, 65: 597-620.
- [5] 邱华东, 田建艳, 杨双庆, 等. 基于案例推理的热轧融合模型控制[J]. 钢铁, 2015, 50(4): 88-94.  
QIU Hua-dong, TIAN Jian-yan, YANG Shuang-qing, et al. Fusion modeling of the hot mill based-on case-based reasoning[J]. Iron and steel, 2015, 50(4): 88-94.
- [6] BROWN D, ALDEA A, HARRISON R, et al. Temporal case-based reasoning for type 1 diabetes mellitus bolus insulin decision support[J]. Artificial intelligence in medicine, 2017(85): 28-42.
- [7] 李晓明, 林学东, 冯志书, 等. 基于案例推理的某型航空发动机防喘控制系统故障诊断[J]. 科学技术与工程, 2018(21): 320-326.  
LI Xiao-ming, LIN Xue-dong, FENG Zhi-shu, et al. Fault diagnosis case-based reasoning of anti-surge control system of a certain type aero-engine[J]. Science technology and engineering, 2018(21): 320-326.

- [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- WANG Yong. Manifold learning based classification and clustering approaches with their applications[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
- [16] SOUVENIR R, PLESS R. Manifold clustering[J]. Proceedings, 2005, 1(1): 648-653.
- [17] CHEN G, LERMAN G. Spectral curvature clustering (SCC) [J]. International journal of computer vision, 2009, 81(3): 317-330.
- [18] WANG Y, JIANG Y, WU Y, et al. Multi-manifold clustering[C]// Pacific rim international conference on trends in artificial intelligence. Korea: Daegu, 2010: 280-291.
- [19] BABAEIAN A, BAYESTEHTASHK A, BANDARABADI M. Multiple manifold clustering using curvature constrained path[J]. Plos one, 2015, 10(9): 0137986.
- [20] WANG Y, JIANG Y, WU Y, et al. Spectral clustering on multiple manifolds[J]. IEEE transactions on neural networks, 2011, 22(7): 1149-1161.
- [21] ROWEIS S T, SAUL L K. Nonlinear dimensionality reduction by locally linear embedding[J]. Science, 2000, 290(5500): 2323-2326.
- [22] SAUL L K, ROWEIS S T. Think globally, fit locally: Unsupervised learning of low dimensional manifolds[J]. J machine learning research, 2003, 4(2): 119-155.
- [23] TIPPING M E, BISHOP C M. Mixtures of probabilistic principal component analyzers[J]. Neural computation, 2014, 11(2): 443-482.
- [24] 王帅, 孙华燕, 郭惠超, 等. 激光点云的混合流形谱聚类自适应分割方法[J]. 光学学报, 2017(10): 125-133.
- WANG Shuai, SUN Hua-yan, GUO Hui-chao, et al. Mixed manifold spectral clustering adaptive segmentation method for laser point cloud[J]. Acta optica sinica, 2017(10): 125-133.
- [25] SHI J, MALIK J. Normalized cuts and image segmentation[J]. IEEE transactions on pattern analysis & machine intelligence, 2000, 22(8): 888-905.
- [26] RODRIGUEZ A, LAIO A. Clustering by fast search and find of density peaks[J]. Science, 2014, 344(6191): 1492.
- [27] SEZGIN M, SANKUR B. Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation[J]. Journal of electronic imaging, 2004.
- [28] NG A Y, JORDAN M I, WEISS Y. On spectral clustering: Analysis and an algorithm[J]. Proc nips, 2001, 14: 849-856.

(上接第320页)

- [8] 刘海江, 景施博. 基于案例推理的航天大型薄壁件加工过程质量追溯[J]. 制造业自动化, 2018, 40(4): 3-7.
- LIU Hai-jiang, JING Shi-bo. Quality traceability of machining process of aerospace large thin-wall parts based on CBR[J]. Manufacturing automation, 2018, 40(4): 3-7.
- [9] NUMTHONG C, BUTDEE S. The knowledge based system for forging process design based on case-based reasoning and finite element method[J]. International journal of applied science and technology, 2013, 5(2): 45-54.
- [10] XU T, WADE N S, DAVIDSON E M, et al. Case-based reasoning for coordinated voltage control on distribution networks[J]. Electric power systems research, 2011, 81(12): 2088-2098.
- [11] 陈维克, 范微微, 李忠群, 等. 基于混合推理的大型机床零件切削数据库系统[J]. 中国机械工程, 2015, 26(7): 923-928.
- CHEN Wei-ke, FAN Wei-wei, LI Zhong-qun, et al. Cutting database system of large machine tool parts based on hybrid reasoning method[J]. China mechanical engineering, 2015, 26(7): 923-928.
- [12] 周帆, 江志刚, 张华. 基于改进实例推理的废旧零部件再制造工艺设计[J]. 湖北工业大学学报, 2014(5): 30-34.
- ZHOU Fan, JIANG Zhi-gang, ZHANG Hua. The remanufacturing process design method for used machine tools based on improved case-based reasoning[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2014(5): 30-34.
- [13] 相克俊, 刘战强, 艾兴, 等. 基于混合推理的高速切削数据库系统的建立[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(3): 420-427.
- XIANG Ke-jun, LIU Zhan-qiang, AI Xing, et al. Development of high-speed cutting database system based on hybrid reasoning[J]. Computer integrated manufacturing systems, 2006, 12(3): 420-427.
- [14] CAI R, MORGAN M N. Development of intelligent grinding database[J]. Key engineering materials, 2007, 329(7): 21-26.
- [15] 甘露华. 小孔相贯线超声去毛刺工艺试验研究和数值分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
- GAN Lu-hua. Experimental research and numerical analysis on the intersection line of pinhole ultrasonic deburring[D]. Taiyuan University of Technology, 2015.
- [16] QIAO Z, QU D, WANG H, et al. Experimental investigation of the influence of chip interference on burr height in machining micro V-grooves on electroplated copper roll die[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers part B: Journal of engineering manufacture, 2016, 232(8): 583.
- [17] 韩敏, 沈力华. 基于 FCM 与神经网络的案例推理方法[J]. 控制与决策, 2012, 27(9): 1421-1424.
- HAN Min, SHEN Li-hua. Case-based reasoning based on FCM and neural network[J]. Control and decision, 2012, 27(9): 1421-1424.
- [18] 张传辉, 田建艳, 高伟, 等. 基于模糊聚类分析的风电功率预测研究[J]. 太原理工大学学报, 2018(1): 133-139.
- ZHANG Chuan-hui, TIAN Jian-yan, GAO Wei, et al. Research on wind power forecasting based on fuzzy clustering analysis[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2018(1): 133-139.