

# 一种基于实例推理的刀具选配方法研究<sup>\*</sup>

## Research on Case-based Reasoning Method of Tool Selection

西北工业大学现代设计与集成制造教育部重点实验室 张维 王嘉

**[摘要]** 为了快速准确地选择出合适的切削刀具,提出了一种基于实例推理的刀具选配方法,利用以往的经验 and 知识来解决新的刀具选择问题。重点研究了刀具选配实例的知识表示和检索匹配。最后举例验证了方法的可行性。

**关键词:** 刀具选配 实例推理 知识表示 相似度

**[ABSTRACT]** In order to select the suitable cutting tools quickly and accurately, a case-based reasoning method of tool selection is presented. The method uses past experience and knowledge to solve new problems of tool selection. The knowledge representation and retrieve strategy of tool-selection case is investigated. In the end, an example is given to verify the feasibility of the proposed method.

**Keywords:** Tool selection CBR Knowledge representation Similarity

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.01/02.077

刀具是参与制造活动的重要工具,并且是较昂贵的消耗性资源,切削刀具的合理选择对加工成本的降低、被加工零件的精度和生产效率的提高将产生很大的影响。刀具数量巨大、信息繁多,在选择过程中涉及到工件材料、工件尺寸形状、加工精度、切削参数等因素,故刀具的选择是一个非常复杂的过程。

刀具的选择主要依靠的是经验和知识,工艺人员都是通过回忆以前的选配案例,并和当前的新问题进行比较、分析,得出新问题的解决方案,人类的这种思维活动模拟到人工智能中即实例推理(Case-based Reasoning, CBR)。利用实例推理技术可根据以前的刀具选配记录和经验知识为切削加工提供合理的刀具选择方案,解决了基于规则的专家系统的规则提取瓶颈<sup>[1-2]</sup>。本文提出一种基于实例推理的刀具选配方法,重点研究了刀具选配实例的知识表示和检索匹配。

## 1 基于 CBR 技术的刀具选配模型

CBR 系统的基本原理是一致的,但是在具体领域

应用和实现时,需要根据所求解问题的特点,采取适当的知识表示、索引方式和检索匹配算法等<sup>[3]</sup>。基于 CBR 的刀具选配过程如图 1 所示,其过程具体分为如下 3 个步骤<sup>[4]</sup>:

(1) 生成问题实例。输入加工要求、工件形状特征和材料信息作为求解问题的初始条件,用统一的知识表示方法加以组织,形成问题实例。

(2) 实例的检索匹配。按照一定的检索匹配策略从实例库中搜索相似的刀具选配实例。当检索的相似实例较少或没有得到相似匹配实例时可以对检索条件进行修改调整,以选取更多的相似实例。

(3) 实例修改与保存。对检索匹配出的刀具选择结果和切削参数等信息进行修改优化,使其更好地适合新情况。将修改后的信息作为新问题的解决方案,经过确认和验证,将新的问题及其解决方案组织成新的实例,存储在实例库中。

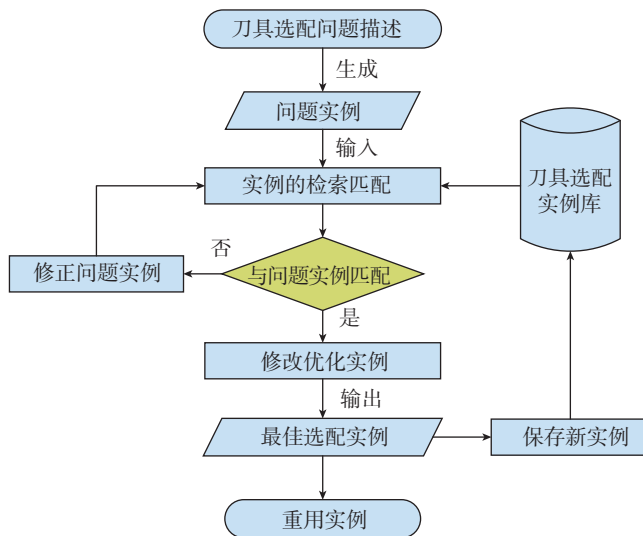


图1 基于CBR的刀具选配工作流程

Fig.1 Work processes of CBR method of tool selection

## 2 刀具选配知识表示

### 2.1 刀具选配实例

在生产加工中,积累了大量的刀具选配方案和选配知识与经验,本文将这些信息以一种结构化的形式进行有效的组织,形成刀具选配实例,使之成为计算机可以

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(50505039)资助。

识别和利用的数据结构。

知识表示首先要提取出有用的特征属性,为定义刀具选配实例,对工件及其切削加工进行分析,抽取其主要的共同特征,由这些共同特征来对实例进行典型描述。一个刀具选配实例包括2部分内容:(1)所求解刀具选配问题的描述,它反映了选择刀具时所提出的要求,是实例检索的依据;(2)刀具选择的结果,是在满足特定切削要求下所获得的刀具选配结果的结构化组织,实例检索的目的就是要找到并提取这一部分结果或知识。当对工件进行切削加工时,首先要知道工件信息,如工件类型、加工面类型、加工精度以及工件材料的类别、牌号、硬度和状态等;然后才能针对该工件选择相应的加工刀具,获得所选择的刀具的名称、型号、制造商和材料等信息。前者正好对应着实例的问题描述部分,后者对应着实例的解决方案<sup>[5]</sup>。

### 2.2 实例的框架表示

针对刀具选配实例的特点,本文采用框架知识表示法表示实例。框架理论的基本思想是,当人们面临一个新的情况时,只要将新的数据填入已有的数据结构,就形成了一个具体的实体。因此,我们把关于一个典型实体的通用数据结构称为一个框架。在框架表示法中,事物属性的总和称为框架,每个属性称为框架的一个槽,具体属性值称槽值。对一个复杂的框架,槽还可分成若干个侧面,每个侧面由侧面名和侧面值组成<sup>[6-7]</sup>。

如图2所示,首先根据特定的加工类型,将刀具选配知识分类为车削框架、铣削框架、钻削框架和镗削框架。每一种加工类型的框架由许多特征属性组成,某几个特征属性共同描述了某一方面的信息,把共同描述某一方面信息的特征属性归为一类,看成一个“知识类”,知识类对应框架结构的“槽”,具体的特征属性就对应框架结构的“侧面”,属性值就是侧面值。

框架可以表示抽象概念,也可以表示具体实例。表

1~2 分别是一个表示刀具选配的通用框架和一个具体框架。

## 3 刀具选配实例的检索匹配

实例检索匹配就是新的问题实例与已有库存实例的相似匹配,相似匹配通过相似度来衡量。由于同一框架的不同刀具选配实例的特征属性是相同的,且同一特征的权重在不同实例中也相同,对这种实例库的搜索正是最近邻法的强项。实例以一定的组织方式存储于实例库中,通过建立良好的索引机制,对实例进行分类。归纳索引法就是利用索引将实例库分类区分开来,缩小了检索匹配的范围,以便快速地搜索到相关实例<sup>[8]</sup>。本文将最近邻法与归纳索引法结合起来,采用一种基于相似度的刀具选配实例检索匹配算法。

### 3.1 刀具选配实例检索匹配流程

为解决刀具选配实例的检索匹配问题,将整个检索过程可分为2个阶段,检索匹配过程如图3所示。

第一阶段是实例预选阶段,产生候选实例集。构建一个便于实例提取的索引机制,根据索引项,实现实例的快速搜索。从实例库中搜索出一部分实例构成候选实例集,使第二阶段的实例相似性评估仅在该子集中进行。

第二阶段采用最近邻法,通过相似性度量将新的问题实例和候选实例集中实例进行匹配。对第一阶段检索得到的实例进行相似度计算,对达到阈值的实例进行相似度排序,相似度最大的实例就是最佳匹配实例,阈值内没有匹配实例则匹配失败。

然后决定是否重用最佳匹配实例或在此基础上进行修改直至满足要求,最后输出最终选配方案。

### 3.2 索引分类

一个实例的索引就是这个实例的重要特征属性的集合,这些属性可以将这个实例同其他实例区分开来。

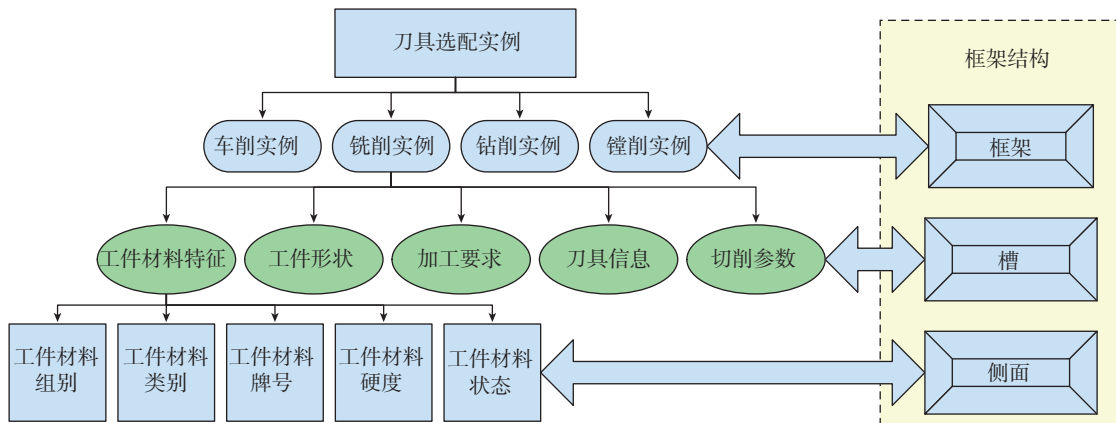


图2 刀具选配框架知识表示总体思路

Fig.2 General idea about knowledge representation of tool-selection framework

表1 刀具选配通用框架

刀具选配实例		属性	属性值
问题描述	实例标识	实例编号	(单位)字母、数字
		加工工艺类别	(范围)铣削、车削、钻削、镗削
	工件材料特征	工件材料组别	(范围)钢、铸铁、不锈钢、铝合金、耐热合金、钛合金
		工件材料类别	(范围)碳素钢、低合金钢、高合金钢、铸钢、不锈钢、超硬钢、可锻铸铁、灰铸铁、球墨铸铁、铁基合金、镍基合金、钴基合金、钛合金、铝合金、铜合金
		工件材料牌号	(单位)金属材料牌号
		工件材料硬度	(单位)布氏硬度 HB
		工件材料状态	(范围)锻造、铸造、轧制、热处理、焊接
	工件形状	工件类型	(范围)轴类、盘类、箱体类、薄壁类、其他
		加工面类型	(范围)平面、阶梯面、外圆、内圆、环型槽、长槽、曲面、螺纹、孔
		工件尺寸	(单位)长宽比、直径
加工要求	加工精度	(范围)粗加工、半精加工、精加工、超精加工	
	加工数量	(范围)大批量、小批量、单件	
选配结果	刀具信息	刀具名称	(范围)圆柱形铣刀、面铣刀、立铣刀、三面刃铣刀、角度铣刀
		刀具型号	(单位)型号编码
		订货号	(单位)订货标号
		刀具制造商	(单位)厂商名称
		刀具材料类别	(范围)工具钢、硬质合金、超硬刀具材料、其他
	切削参数	切削速度	(单位) $(m \cdot \min^{-1})$
		进给速度	(单位) $(mm \cdot z^{-1})$
		切削深度	(单位)mm

刀具选配实例问题描述部分的特征属性中,工件材料信息、工件形状信息可以视为定性特征,对这些定性特征进行分类编码,以此分类为基础建立实例的索引。通过精确匹配的方式进行检索,即将问题实例的索引项的值和实例库中的所有实例的对应属性值进行比较,只有全部精确匹配满足的实例才被加入到候选实例集中,候选实例集通常是实例库的一部分。本文将刀具选配实例的问题描述部分分为3类,分别提取出一个特征作为索引项:

(1)实例标识信息:按照加工工艺类别建立索引;

(2)工件材料信息类:按照待加工工件的材料组别建立索引;

(3)工件形状信息类:按照工件类型建立索引。

### 3.3 刀具选配实例相似度的计算

表2 刀具选配框架实例

刀具选配实例		属性	属性值
问题描述	实例标识	实例编号	XA1001
		加工工艺类别	铣削
	工件材料特征	工件材料组别	铸铁
		工件材料类别	灰铸铁
		工件材料牌号	HT250
		工件材料硬度	209HB
	工件形状	工件材料状态	铸造
		工件类型	箱体类
		加工面类型	平面
	加工要求	工件尺寸	$\phi = 160\text{mm}$
加工精度		粗加工	
选配结果	加工数量	加工数量	单件
		刀具名称	面铣刀
	刀具信息	刀具型号	CoreMill365
		订货号	R365-160Q40-S15M
		刀具制造商	山特维克
		刀具材料类别	超硬刀具材料
	切削参数	切削速度	126m/min
		进给速度	0.60mm/z
切削深度		2.5mm	

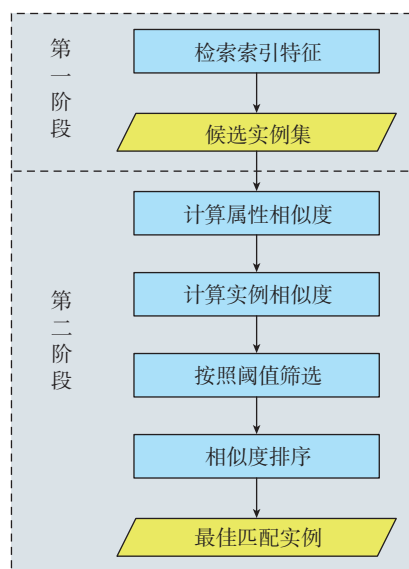


图3 实例检索匹配流程图

Fig.3 Flow chart of CBR retrieve strategy

对通过索引检索得到的候选实例集,应用最近邻法进行匹配操作。相似度用来量化两个实例的相似程度,

一个高效的相似度计算方法也是实例推理系统最重要特征。

(1) 属性相似度的计算。

属性相似度指的是两个实例的同一属性的不同取值间的相似度,记为  $\text{sim}(x_i, y_i)$ , 取值范围为  $[0, 1]$ , 其中  $x_i$  和  $y_i$  分别表示新旧实例第  $i$  个属性的不同取值。

本文确定了每个特征属性的相似度计算公式,或者确定其各个属性值之间互相对应的相似度值。除去作为索引项的 3 个特征属性,剩下的 8 个特征属性中:

① 工件材料硬度和工件尺寸的属性值是一个具体的数值,其属性相似度可用式(1)计算:

$$\text{sim}(x_i, y_i) = \frac{|x_i - y_i|}{x_i + y_i} \quad (1)$$

② 加工精度和加工数量,其局部相似度可用式(2)计算:

$$\text{sim}(x_i, y_i) = 1 - \frac{|x_i - y_i|}{M} \quad (2)$$

式中  $M$  为特征属性的最大赋值,如加工精度分为粗加工、半精加工、精加工、超精加工,依次定义为 1, 2, 3, 4, 此时  $M=4$ ; 加工数量以此类推。

③ 工件材料类别、工件材料牌号、工件材料状态和加工面类型的相似度不能用一个通用的公式表示,要根据具体情况和经验给出相应的值,这些特征属性的任意两个属性值对应一个属性相似度。工件材料类别、工件材料状态和加工面类型的各属性值互相对应的相似度值分别如表 3、表 4、表 5 所示<sup>[5]</sup>。工件材料牌号繁多,讨论其属性相似度具有一定的难度,文献[5]给出了工件材料牌号的分类编号方案和各类牌号之间的相似度。

(2) 整体相似度。

对各属性相似度进行综合,以评估两个实例间的整体相似程度。本文采用加权的欧氏距离来衡量实例间的整体相似性。设  $X$  为问题实例,  $Y$  为候选实例集中的一个实例,则它们之间的相似度定义为:

表3 工件材料类别的属性相似度

工件材料	碳素钢	低合金钢	高合金钢	铸钢	不锈钢	超硬钢	可锻铸铁	灰铸铁
碳素钢	1.0	0.9	0.8	0.7	0.2	0.1	0.3	0.3
低合金钢		1.0	0.9	0.7	0.2	0.1	0.3	0.3
高合金钢			1.0	0.7	0.2	0.1	0.3	0.3
铸钢				1.0	0.3	0.1	0.4	0.4
不锈钢					1.0	0.1	0.1	0.1
超硬钢						1.0	0.2	0.2
可锻铸铁							1.0	0.9
灰铸铁								1.0

表4 加工面类型的属性相似度

加工面	平面	阶梯面	外圆	内圆	环型槽	长槽
平面	1.0	0.8	0	0	0	0.6
阶梯面		1.0	0	0	0	0.6
外圆			1.0	0.8	0.8	0
内圆				1.0	0.8	0
环型槽					1.0	0
长槽						1.0

表5 材料状态的属性相似度

材料状态	锻造	铸造	轧制	热处理	焊接
锻造	1.0	0.1	0.5	0.1	0
铸造		1.0	0	0	0
轧制			1.0	0.1	0
热处理				1.0	0
焊接					1.0

表6 问题实例及候选实例集

		问题实例 Y	X001	X002	X003
问题描述	铣削	铣削	铣削	铣削	铣削
	铸铁	铸铁	铸铁	铸铁	铸铁
	灰铸铁	球墨铸铁	可锻铸铁	灰铸铁	
	HT300	QT450-10	KTZ650-02	HT250	
	210HB	180HB	220HB	199HB	
	铸造	热处理	热处理	铸造	
	箱体类	箱体类	箱体类	箱体类	
	阶梯面	长槽	曲面	平面	
	$\phi=200\text{mm}$	长宽比 4	$\phi=90\text{mm}$	$\phi=180\text{mm}$	
	半精加工	精加工	半精加工	粗加工	
选配结果	小批量	大批量	单件	单件	
	待求解	面铣刀	立铣刀	面铣刀	
		SA90	JH111	CoreMill365	
		50R3SD12-P22	111021-MEGA-64	R365-160Q40-S15M	
		成都千木	山高	山特维克	
		硬质合金	硬质合金	超硬刀具材料	
		320m/min	200m/min	126m/min	
			0.30mm/min	0.60mm/z	
		0.20	2.5mm		

$$\text{sim}(X, Y) = 1 - \sqrt{\sum_i \omega_i^2 \text{sim}^2(x_i, y_i)} \quad (3)$$

表7 属性相似度与整体相似度计算结果

实例	材料类别	材料牌号	材料硬度	材料状态	加工面类型	工件尺寸	精度	数量	整体相似度
X001	0.800	0.900	0.077	0	0.6	0	0.750	0.667	0.711
X002	0.900	1.000	0.023	0	0.4	0.379	1.000	0.667	0.704
X003	1.000	0.900	0.026	1	0.8	0.053	0.750	0.667	0.641
权值	0.263	0.132	0.132	0.026	0.263	0.132	0.026	0.026	

式中: 权重  $\omega_i$  代表第  $i$  个属性的重要程度,  $\sum_i \omega_i = 1$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ),  $n$  是实例的属性个数。

距离最小的实例是最相似的实例, 所以整体相似度值按照由小到大排序<sup>[9-11]</sup>。

### 3.4 属性赋权

根据各特征属性对刀具选择结果的影响程度, 对各属性赋予不同的权值, 将它们分为 3 个等级, 从高到低依次为: (1) 工件材料类别、加工面类型; (2) 工件材料牌号、工件材料硬度、工件尺寸; (3) 工件材料状态、加工数量、加工精度。依据每级属性的权值应大于低等级所有属性权值和的原则, 给出一个具体的分配方案<sup>[12]</sup>: 一级属性的权值为 0.263, 二级属性的权值为 0.132, 三级属性的权值为 0.026。

## 4 实例分析

本文以一个问题实例的检索匹配过程为例, 对基于 CBR 的刀具选配方法进行进一步说明, 验证上述方法的可行性。

首先, 将新的刀具选配问题组织成问题实例, 通过索引特征的初步检索从实例库中得到一个候选实例集合, 问题实例和候选实例集如表 6 所示。

计算问题实例与 3 个候选实例的属性相似度, 并将权重、属性相似度代入公式(3)计算整体相似度值, 计算结果如表 7 所示。

距离越小则表示 2 个实例越相似, 备选实例 3 的整体相似度值最小, 为最佳匹配实例, 则新问题选用实例 3 的刀具选配结果。

## 5 结束语

本文对基于 CBR 的刀具选配模型及其关键技术进行了研究: (1) 提出了用框架结构对刀具选配实例进行知识表示, 把刀具选配实例对应到框架结构中, 建立了刀具选配实例框架。(2) 建立了索引来提高检索效率, 对刀具选配实例的特征属性分类, 并给出了每个特征属性的属性相似度的计算方法及实例整体相似度的计算公式。最后通过实例验证了其可行性。

## 参考文献

- [1] Edalew K O, Abdalla H S, Nash R J. A computer-based intelligent system for automatic tool selection. *Materials & Design*, 2001, 22(5): 337-351.
- [2] Carpenter I D, Maropoulos P G. A flexible tool selection decision support system for milling operations. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 107(1-3): 143-152.
- [3] Gupta U G. How case-based reasoning solves new problems. *Interfaces*, 1994, 24(6): 110-119.
- [4] 王遵彤, 刘战强, 万熠, 等. 相似度及基于实例推理在高速切削数据库中的应用. *机械科学与技术*, 2003, 22(3): 432-434.
- [5] 王遵彤, 刘战强, 艾兴. 高速切削中实例相似度及其应用的研究. *计算机集成制造系统*, 2005, 11(5): 722-726.
- [6] 李太福, 黄茂林, 赵明富. 旋转机械故障诊断的框架知识表示. *辽宁工程技术大学学报*, 2002, 21(5): 634-636.
- [7] 黄玉祥, 朱瑞祥, 郭康权, 等. 基于实例推理技术的农业机械标书评价方法. *农业机械学报*, 2006, 37(7): 91-94.
- [8] 张开富, 李原, 彭培林, 等. 基于实例的飞机装配协调方案设计技术研究. *西北工业大学学报*, 2006, 24(2): 250-254.
- [9] 刘晋飞, 李沪曾. 本体思想在高速切削专家系统中的应用. *计算机集成制造系统*, 2008, 14(6): 1156-1161.
- [10] Liao T W, Zhang Z M, Claude R M. Similarity measures for retrieval in case-based reasoning systems. *Applied Artificial Intelligence*, 1998, 12(4): 267-288.
- [11] Burkhard H D. Similarity and distance in case-based reasoning. *Fundamenta Informaticae*, 2001, 47(3-4): 201-215.
- [12] 相克俊, 刘战强, 艾兴. 基于混合推理的高速切削数据库系统的建立. *计算机集成制造系统*, 2006, 12(3): 421-427.

(责编 亿霖)

(上接第 76 页)

环节, 上述管理方案虽然实施条件上仍有些欠缺, 但该方法能够有效地控制零部件技术状态, 满足管理需求, 其思路和逻辑是正确的、值得借鉴的, 因此在后续型号应用中有一定的参考价值。

## 参考文献

- [1] 刘晓冰, 孟永胜, 邢英杰, 等. 制造领域工程更改管理系统的技术研究. *中国机械工程*, 2005(15): 23-29.
- [2] 潘翔, 王云鹏, 郭学旭, 等. 协同设计中的版本管理解决方案. *航空制造技术*, 2004(1): 16-21.
- [3] 柏彦春, 于勇, 范玉青, 等. 工程更改在飞机项目中的应用. *航空制造技术*, 2003(9): 38-43.
- [4] 约琴夫·萧塔纳. 制造企业的产品数据管理. 祁国宁译. 北京: 机械工业出版社, 2000: 67-91.
- [5] 胡斌. 变更信息管理机制及其在 PDM 变更管理中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2004: 13-24.
- [6] 万立, 罗新星. 产品数据管理中的工程变更管理的建模与实现. *计算机辅助工程*, 2004(2): 25-30.

(责编 一帆)