

用于机加工产品设计过程降低成本 求解的知识表示方法*

姜少飞¹ 卢纯福¹ 鲁聪达¹ 杨礼康²

(1. 浙江工业大学机械制造及自动化省部共建教育部重点实验室 杭州 310032;

2. 浙江科技学院机械与汽车工程学院 杭州 310012)

摘要: 为解决由于评价对象的不确定性造成的无法有效应用降低成本知识的问题, 针对机加工类产品降低成本知识进行分类, 指出知识之间的相互嵌套关系。分析降低成本知识的特点, 提出一种适用于降低成本求解过程的集成成本知识元—规则—框架(CKE-R-F)的混合知识表示方法, 用产生式规则作为知识表示主体, 内嵌框架定义和成本知识元用以表达知识内容之间的相互关系。建立降低成本知识库, 实现知识的交互获取与知识库的维护功能, 并将其应用于设计过程的降低成本求解过程中。

关键词: 知识相互嵌套 成本知识元 框架单元 评价单元 关联单元

中图分类号: TH166

0 前言

产品设计的优化体现在技术性与经济性的综合优化上, 设计阶段决定了产品最终的成本走向, 因此确定设计方案时考虑降低成本对产品优化有重要意义。产品设计阶段降低成本的过程实质上是一个基于知识推理的过程, 复杂的降低成本知识体系构成了降低成本的求解网络, 知识之间的嵌套和相互调用关系也决定了降低成本求解是一个复杂的基于知识的推理过程。这里主要研究面向机加工类产品降低成本求解过程的知识表示方法, 并建立相关知识库。

降低成本知识存在于产品的全生命周期每一个阶段和过程, 设计阶段的降低成本知识贯穿于概念设计、详细设计、施工设计的全过程, 概念设计阶段的知识主要是依据已有的设计经验寻求可能达到低成本的作用原理及作用原理组合; 详细设计阶段降低成本则涉及到结构设计(力传导原理、任务分配原理等)在具体产品设计中的表达, 以及结构设计的工艺性知识(面向制造、面向装配、面向回用、零部件标准化的结构设计知识); 施工设计阶段降低成本主要考虑优化产品的加工工艺、优化配置企业生产资源, 通过这种优化达到降低成本的目的。在产品生命周期的销售、使用、维护和回收等设计的后续阶段, 也都有降低成本的可能, 而只要有这种可能, 就可以总结出适用于这些阶段的降低成本知

识, 但这些知识与具体产品紧密相连, 领域性强, 只能根据实际情况总结。由于设计阶段决定了产品的绝大部分成本, 而降低成本的最佳时机也是产品的设计过程, 因此主要研究产品设计阶段降低成本的知识, 并不包含产品生命周期中设计后续阶段的降低成本知识。

目前, 产生式、框架、语义网络、面向对象和 Agent-based 等知识表达方法已有成熟应用^[1-8], 但仔细分析发现现有的知识表示方法没有一种能完整地表达所有的降低成本知识, 必须寻求一种新的知识表示机制以满足降低成本推理的需求。文献[9]提出了一种用于 DFMA(面向制造与装配的设计)的集成知识表示语言 IKRL(Integrated knowledge representation language), 将面向对象、规则和框架等知识表示方法与评价特征结合在一起, 较好地满足了零件面向制造与装配分析的要求, 但没有表达出知识之间的内在联系与冲突, 在知识的全局观上仍有一定局限性。文献[10]提出采用基于多智能体的策略来描述降低成本的求解过程, 从理论上讲, 采用基于多智能体结构的降低成本框架可以把知识分散在各个子智能体中, 每个子智能体独立表达各自的知识, 独立设计推理机。这种策略的优点是可以较灵活地组织知识库与推理机, 缺点是必须为每个子智能体都设计一套知识表示方法与推理机, 知识维护的代价大。为了方便知识的维护, 提高推理效率, 采用统一的知识库表达降低成本的知识再分为多个知识库的策略来组织知识, 容易实现统一的知识维护与管理, 而一种有效的降低成本知识表示方法是进行有效推理的前提。

* 浙江省自然科学基金(Y105207)和国家自然科学基金(50305034)资助项目。20060321 收到初稿, 20060828 收到修改稿

1 机加工类产品的降低成本知识体系

不同的人看待降低成本问题的角度不同,造成了降低成本知识的不同分类方法,一般按设计进程对知识进行分类。除此之外,还可从产品结构入手,以产品子结构(部件、零件)为对象考虑成本,也可以认为产品成本是由材料成本、加工成本、装配成本等构成,从产品成本结构的角看待降低成本问题,此时降低成本的知识可分为降低材料成本知识、降低加工装配成本知识等。考虑到产品设计的进程具有连续性,即使明确区分各个设计阶段也无法将它们分别独立出来,因为各阶段之间的联系十分紧密,设计信息是自顶向下继承和扩展的,因此,按设计阶段表达降低成本的知识实施起来有相当难度,也不利于降低成本的推理。经再三权衡,综合考虑机加工类产品结构及产品的成本结构,将降低成本知识分为降低材料成本的知识、降低加工制造成本的知识、降低结构成本的知识 and 零部件标准化知识等几大类,每一类知识又包含几个子类知识,如图 1 所示。这样组织降低成本知识能够使知识的类别较为清晰,而且兼顾了产品本身的结构和成本结构,能够满足不同视角的降低成本推理需要。同时,知识表示服务于降低成本推理,决定了产品的成本模型、降低成本知识库、降低成本推理机三者必须紧密结合才能完成推理任务,采取这种组织方式对整个推理过程来说,可实现性较好。

2 降低成本求解中的知识相互嵌套

图 1 知识体系中的各类降低成本知识分别隶属于各自的子智能体(降低材料成本智能体,降低加工装配成本智能体,降低结构成本智能体,零部件标准化智能体)^[10],降低成本的求解过程就转化为各子智能体的协作求解过程,这个过程的关键点有二:一是子智能体知识的运用;二是各个子智能体之间的协作推理。子智能体的独立推理能力固然重要,但子智能体之间的相互合作协同求解才是多智能体策略优越性的集中体现。而推理的基础是降低成本的知识体系,可以认为多智能体的协作求解过程就是知识之间的相互嵌套调用过程。

比如,对于一个典型箱体类零件有如下的降低成本分析过程:选择箱体材料时,单纯考虑材料本身成本时应选用灰铸铁,但灰铸铁的切削加工性不是最好,可能造成后续加工成本的升高,而铸造铝合金的切削加工性好于灰铸铁,但其材料本身成本

高。因此选择材料时不仅要启用材料选择知识,还要参考加工工艺性知识,由它们协同求得最佳成本解。在这个过程中,称这两种知识之间的相互协同为“知识相互嵌套”。知识嵌套可分为以下两类。



图 1 降低成本的知識體系

(1) 同一知識在不同知識類別中的不同表現形式造成推理過程的知識相互嵌套。比如“斜孔加工工藝性差”這條知識在降低加工成本知識類里表達為“斜孔會增加裝夾與刀具調整次數,造成輔助工時過高”,在降低結構成本知識類里則表達為“斜孔的結構工藝性差,建議改用非斜孔替代”。這兩種表達的實質都是“斜孔加工工藝性差”這條知識,不過它們處於不同的知識分類中,對成本的視角不同,不存在知識冗余問題。這兩種表達可認為是一種相互嵌套。

(2) 知識的相關性造成的知識之間的相互嵌套調用。這種情況是由知識本身的专业內涵決定的,表明了知識之間的本质聯系。比如結構工藝性知識“軸段上的兩個平鍵槽結構尺寸盡量保持一致”在啟用時應該自動在其他知識類別中尋找與其相關的知

识,在加工工艺类知识里发现“尽量减少刀具、夹具的调整次数以减少辅助工时”这条知识与之相关,这两条知识的协作结果就是推理出如下结果:建议修改其中一个平键槽的结构尺寸使得两键槽尺寸相同;结构修改依据:减少刀具、夹具的调整次数可以减少辅助工时。这个例子充分说明了知识之间的内在相关性,这种相关性决定了不同知识之间应该协同推理而不是相互之间独立发挥作用。知识表示应该充分考虑和挖掘不同类知识之间的相互嵌套关系,表达降低成本知识的时候也要把这种关系考虑进去。

3 降低成本知识的特点及知识表示中的问题分析

3.1 机加工类产品降低成本知识的特点

机加工类产品降低成本知识的特点体现在以下几个方面。

(1) 通用性知识占较大比例。降低成本知识有很大一部分是通用的指导性知识,比如加工类知识“批量较大时加工工序尽量集中以减少辅助工时”就是一条通用的降低成本知识。这类知识在知识库中表达时是分散到具体的评价对象中的。

(2) 评价对象的范围广。从产品结构的角度来看,大到整个产品,小到零部件乃至特征,都能够进行降低成本分析。与此相对应,降低成本知识所涉及的范围也应该这么广泛。

(3) 知识的经验性强。书本中欠缺了很多由工程实践产生的降低成本知识,这些经验知识(通常可认为是专用知识)往往对解决实际问题很有效,是降低成本知识的重要组成部分。

(4) 知识中常包含几何约束关系。零部件或零件的特征之间的几何约束关系(如:同轴关系、共面关系等)常常是降低成本知识的前提条件。

(5) 知识中常常要处理表达式与逻辑关系。一些工程语义必须用表达式来说明才能被计算机理解,以下举例说明。

例 1:“细长轴”这一工程语义在知识库中的表达是: L 为轴段长度, D 为轴段直径, $L > 15D$ 。

例 2:判断零件表面精度是否过高,在知识库中只能这样表达: t 为表面粗糙度, $t < 0.1$ 。

逻辑关系(与、或、非)表明了知识前提的内在联系,也是知识的要素之一。比如“相邻轴段外径相差太多时应改结构为两个零件的装配”这条知识中“外径相差太多”在表达时必须处理这样的逻辑关系: $D_1 > D_2 \times 8$ [OR] $D_2 > D_1 \times 8$ 。

3.2 降低成本知识表示要解决的关键问题

降低成本知识表示要解决的关键问题有以下几个方面。

(1) 知识所属领域的广泛性。正如前面所述,降低成本知识贯穿产品全生命周期,知识的领域分布十分广泛,涵盖了材料选择、毛坯成形方法、设计原理方案、结构设计经济性准则、结构工艺性知识和加工装配知识等。

(2) 知识的通用性与评价对象不确定性之间的冲突。同一条知识可用于结构完全不同的产品或零部件,针对具体的产品如何启用通用性知识是知识表示研究的重要课题。

(3) 知识之间的相互嵌套。

(4) 知识的模糊性。很多知识在表述上具有模糊性,增加了表达的难度。比如“一般情况下,零部件表面精度不宜过高”这条知识中的“过高”就具有模糊性,必须依据具体情况确定“过高”的标准。

(5) 不同种类知识之间的冲突。一个降低成本问题可以从不同角度得到不同的解,这些解之间可能存在冲突,而冲突的来源就是得出这些解的知识之间的冲突。比如“结构复杂的零件加工难度大成本高”要求将结构复杂的零件改为多个结构简单件的装配体,与知识“尽量减少产品的零件数目”冲突,必须在二者中做取舍。

(6) 知识的可扩展性。随着新技术、新工艺的不断涌现,降低成本的知识库规模也随之要更新和增删,补充新的知识,更新或删除旧知识。

(7) 知识的表示形式。如何在知识库中形式化地表达已有的知识对于推理机的设计至关重要,同时,知识表示形式的好坏直接决定了降低成本推理系统的性能。

(8) 知识库的维护。知识库的存储分为内部存储和外部存储两种,内部存储由于不灵活而逐渐被淘汰,外部存储可以实现知识库和推理机的分离,便于知识的维护,因此降低成本知识库采用外部存储的方式,除此之外,再外置知识的维护工具。

3.3 CKE-R-F 表示法

根据以上分析,提出一种适用于降低成本求解过程的集成成本知识元—规则—框架(Cost knowledge element-rule-frame)的知识表示方法,以下简称 CKE-R-F。

CKE-R-F 表示法的要点如下所述。

(1) 成本知识元。正如前面所述,推理过程中的知识相互嵌套是降低成本知识自身的特点,这一特点必须在知识库中体现出来。为此,CKE-R-F 中用成本知识元体现知识的嵌套关系。所谓成本知识

元,就是把降低成本知识按照类属分解为若干个知识元,每个知识元再细分为几个知识子元,并标识各个知识元和知识子元之间的关系,通过由知识元和知识子元构成的知识元网络来处理知识之间的嵌

套,组成知识元的知识包含在知识子元内。当知识扩展时,可以在原来的网络里动态添加新的知识元,只需要标识新知识元与原有知识元的嵌套关系即可。CKE-R-F 目前的知识元网络如图 2 所示。

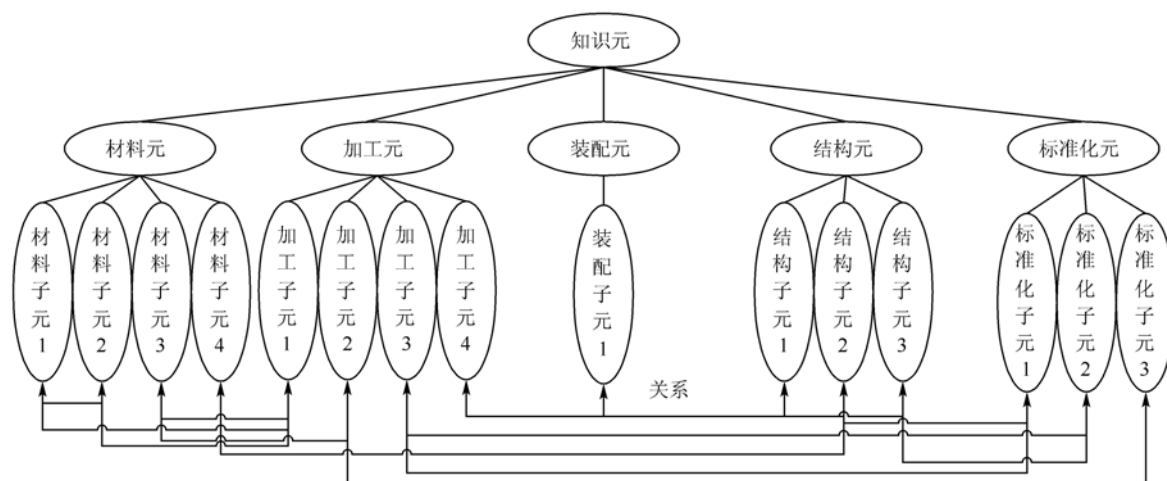


图 2 CKE-R-F 的知识元结构

图 2 中各知识子元的含义如下所述。

材料子元 1——选材元

材料子元 2——材料热处理元

材料子元 3——材料的加工性元

材料子元 4——材料的结构性元

加工子元 1——毛坯工艺与成形方法元

加工子元 2——工艺、机床、夹具和刀具选择元

加工子元 3——工艺相似性的成组知识元

加工子元 4——结构的工艺性知识元

装配子元 1——装配知识元

结构子元 1——结构方式知识元

结构子元 2——结构设计原理元

结构子元 3——结构设计经济性知识元

标准化子元 1——标准件、通用件选用知识元

标准化子元 2——互换性知识元

标准化子元 3——工艺装备优化知识元

图 2 中的双箭头连线标识了知识子元之间的嵌套关系,表明处于这些知识子元中的知识具有相关性,在推理的时候,除了搜索本知识元之外,还要遍历相关知识元,寻求接近的解。具体表达知识元时,在知识库的规则体中用一个字段标明该条规则所属的知识元,在另一个字段中表明该知识元的相关知识元即可。比如“齿轮上的孔的热处理工序放在加工工序之前,以减少废品率降低成本”这条知识在知识库中表达时,先标明该知识属于材料子元 2(即热处理元),再标明该知识元的相关知识元为“加工子元 2(即工艺、机床、夹具和刀具选择元)”,这样在求解时,如果搜索到这条知识,推理机会根

据知识元的相关关系再去加工子元 2 中寻找相近的降低成本解。

(2) 知识表示主体。降低成本知识一般都可以被表示为一系列相对独立的求解操作,这点恰恰是产生式表示方式的优点,而且产生式规则直观,符合人的思维习惯,故 CKE-R-F 表示法采用产生式规则的形式作为知识表示主体,规则的前提和推理结论都是表达知识的数据表的字段,知识的前提条件包括了框架、数学表达式、逻辑关系以及规则的关键词。

(3) 框架定义^[9]。产生式规则过于割裂前提条件之间的联系,使得结构性知识的表达变得困难,比如要描述一个部件中的两个零件的装配关系,单纯用产生式规则表示就很困难。为此,CKE-R-F 法引入了框架,利用框架表示法善于表达结构性知识的特点,与产生式规则混合使用,弥补产生式规则表示的不足。在规则中定义“评价单元”、“关联单元”和“框架单元”,其中“框架单元”是框架体,“评价单元”和“关联单元”是它的实例化,或者说是子对象,“评价单元”与“关联单元”处于同样的地位,都是该规则的评价对象,用来表示评价对象之间的关系;“框架单元”处于“评价单元”的上层,表明“评价单元”的隶属关系,二者共同构成一个框架。在一条规则中,“评价单元”是必须的,因它是规则的承载主体,“关联单元”和“框架单元”可以缺省,在非缺省情况下也作为规则的前提条件。比如表达知识“与通孔有装配关系的轴段应设计倒角以降低装配难度”,应该有如下定义。

框架单元：装配体

评价单元：轴段

关联单元：通孔，插入

这三个单元共同构成了一个框架的要素。

(4) 数学表达式。借用 IKRL 表示数学表达式的方法，在 CKE-R-F 中可以定义变量及数学表达式，比如“细长轴”这一工程语义在规则体中表达时，采取如下方法：令 D 为直径， L 为长度，则

$$L > 15D$$

(5) 知识前提的逻辑关系^[9]。CKE-R-F 采用逻辑关系标志来区分知识前提中的逻辑关系。这些逻辑关系标志包括：[AND]、[OR]、[NOT]、[NO]，分别表示“与”、“或”、“非”、“没有”关系。

(6) 关键词过滤。关键词是从知识中提炼出来的，作为最能体现知识特点的标志，便于推理机的快速搜索和过滤。同一条知识的关键词可以有多个。比如知识“带有盲孔的零件如果要热处理，最好能够将盲孔改为通孔，避免因结构尺寸厚薄相差悬殊以减少变形或开裂”的关键词是“热处理”和“盲孔”，这样推理时可以快速过滤知识库。

4 知识表示实例

用 CKE-R-F 表示的两条降低成本知识实例，如下表所示。图 3 为按照 CKE-R-F 的知识组织原则构建的机加工类产品降低成本知识库维护系统，该知识库(用 Microsoft Access 2000 开发)已经成功用于基于多智能体模型的降低产品成本求解系统中(受

国家自然科学基金 50305034 资助)，系统根据在产品设计过程中建立的设计过程模型(包含了产品结构、工艺信息)启用由 CKE-R-F 方法建立的设计过程降低成本的知识库进行多智能体推理，得到设计过程降低成本的指导性知识。有关降低成本的多智能体模型，见文献[10-11]。



图 3 知识库维护

5 结论

(1) 降低成本知识的“多视角”性决定了分类方法有多种。综合考虑产品结构和产品的成本结构，将机加工类产品降低成本知识分为降低材料成本的知识、降低加工制造成本的知识、降低结构成本的知识 and 零部件标准化知识等几大类，每一大类知识又包含几个子类知识。

表 知识表示实例

序号	知识表述	用 CKE-R-F 表示的知识的前提条件	推理结论
1	尽量避免细长轴结构	知识元：结构子元 3	
		相关知识元：加工子元 4、11	
		关键词 1：轴	推理结论：建议减少长度或采用空心轴的方法增加直径
		条件 1：框架单元(轴)	
		条件 2：评价单元(轴段)	推理依据：轴段过于细长，加工困难，加工成本过于高昂
2	端盖上的螺钉孔大小尽量相同	条件 3： H 为长度	
		条件 4： D 为直径	
		条件 5： $H > 15D$	
		知识元：标准化子元 1	
		相关知识元：加工子元 2	
		条件 1：框架单元(端盖)	推理结论：建议统一螺钉孔径
条件 2：评价单元(螺钉孔)	推理依据：降低加工调整工时，便于选用尺寸一致的标准件		
条件 3：关联单元(螺钉孔)			
条件 4： D_1 为孔径			
条件 5： D_2 为关联单元(孔径)			
条件 6：[NO] $D_1 = D_2$			

(2) 指出了降低成本知识之间存在嵌套关系,提出了成本知识元的概念并将之应用于集成成本知识元、规则和框架的 CKE-R-F 降低成本知识表达方法中,在一定程度上解决了降低成本知识难于表达的难题。

(3) 以 CKE-R-F 为基础建立了用于多智能体降低成本求解的知识库,并提供了方便的知识库维护功能,该知识库较好地支持了基于多智能体模型的降低产品成本求解过程。

(4) CKE-E-F 还无法实现知识的自动获取,如何高效获取新的降低成本知识是今后研究的重点。

参 考 文 献

- [1] LINDA C. Representations of strategic knowledge in design[J]. Knowledge-Based System, 1998, 11(7): 379-390.
- [2] STEVEN W. Knowledge acquisition and knowledge representation with class: the object-oriented paradigm[J]. Expert Systems with Application, 1998, 15 (3): 235-244.
- [3] BARRETT A R, EDWARDS J S. Knowledge elicitation and knowledge representation in a large domain with multiple experts[J]. Expert Systems with Application, 1995, 8(1): 169-176
- [4] KINGSTON J. High performance knowledge bases: four approaches to knowledge acquisition, representation and reasoning for workaround planning[J]. Expert Systems with Applications, 2001, 21(4): 181-190.
- [5] XUE D, YADAV S, NORRIE D H. Knowledge base and database representation for intelligent concurrent design[J]. Computer Aided Design, 1999, 31(2): 131-145.
- [6] SIEGER D B, SALMI R E. Knowledge representation tool for conceptual development of product designs[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man., and Cybernetics. Orlando: FL, 1997: 1 936-1 941.
- [7] FLORENCE L B, MARIE P C. An agent-based model for domain knowledge representation[J]. Data and Knowledge Engineering, 1999, 29(2): 147-161.
- [8] RICHARDS D, COMPTON P. An alternative verification and validation technique for an alternative knowledge representation and acquisition technique[J]. Knowledge-Based Systems, 1999, 12(1): 55-73.
- [9] 吴永明. 智能化面向制造设计系统的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2000.
- [10] 潘双夏, 姜少飞, 冯培恩. 设计过程降低产品成本的多智能体模型研究[J]. 机械工程学报, 2004, 40(1): 99-103.
- [11] 姜少飞, 赵亮, 潘双夏, 等. 面向降低成本求解的产品成本建模[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(2): 206-210.

NEW METHOD OF MACHINING PRODUCT KNOWLEDGE REPRESENTATION FOR SOLUTION OF COST REDUCTION IN DESIGN PROCESS

JIANG Shaofei¹ LU Chunfu¹
LU Congda¹ YANG Likang²

(1. Key Laboratory for Mechanical Manufacture & Automation of Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032;
2. School of Mechanical & Automotive Engineering, Zhejiang University of Science & Technology, Hangzhou 310012)

Abstract: In order to solve the difficulties of application of cost reduction knowledge, the knowledge of cost reduction for machining product is classified and the nested relation among all kind of knowledge is expressed. A new method of knowledge representation called cost knowledge element-rule-frame (CKE-R-F) is put forward, which integrates cost element, rule and frame, and is suitable for the solution process during cost reduction. Generation rules are main parts of cost reduction knowledge. Relations among knowledge contents are represented by frame element and cost knowledge element. The knowledge base is built based on CKE-R-F, this knowledge based is used by solution procedure of cost reduction in product design process.

Key words: Nested relation among knowledge

Cost knowledge element Frame element

Evaluation element Interaction element

作者简介: 姜少飞, 男, 1975 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为产品设计方法学, 精密模具制造。

E-mail: jsf75@zjut.edu.cn