

DOI: 10.3901/JME.2017.15.066

# 面向创新设计的工艺设计知识模型及检索方法研究\*

郭鑫 赵武 王杰 王晨 张凯 陈领  
(四川大学制造科学与工程学院 成都 610065)

**摘要:** 在工艺设计领域,为扩展创新设计知识空间,提出面向创新设计的工艺设计知识模型及检索方法。在讨论工艺知识特征及知识表达方法的前提下,针对工艺知识特点及领域范围,提出基于目标的工艺设计知识构成要素、基于本体的工艺知识管理逻辑架构,建立工艺设计知识组织模型,以“功能+流+案例”为规则构建作用本体及流本体,并完成对抽象流、工件特征以及制造资源等功能的本体化表达。通过结合创新方法与工艺案例的方法,提出面向目标的工艺设计知识语义模型。基于对功能和流相关本体词汇同位及上下位扩展的研究,利用扩展算法、知识语义检索、分词模型等方法提出可满足创新设计目标的工艺知识检索模型,并建立了原型系统。

**关键词:** 工艺设计; 创新方法; 本体; 知识模型

**中图分类号:** TG156

## A Study of Knowledge Modeling and Retrieval Methods Oriented Towards Innovative Design of Manufacturing Planning

GUO Xin ZHAO Wu WANG Jie WANG Chen ZHANG Kai CHEN Ling  
(School of Manufacturing Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065)

**Abstract:** In order to further extend the knowledge of manufacturing planning innovative design, a knowledge model oriented towards process innovative design and relevant retrieval methods are proposed. Before the discussions of characteristics of process knowledge and its expression, this paper presented the goal-based knowledge constituents and the ontology-based logical structure for management, regarding knowledge features and the scope of it. A knowledge organization model of manufacturing planning design is established, in which the function ontology and flow ontology are constructed under the framework of “function+flow+case”, and the ontological expression of functions such as abstract flow, workpiece characteristics, and manufacturing resources is achieved. Through the combination of innovative methods and methods of manufacturing planning cases, a goal-oriented knowledge semantic model of manufacturing planning design is proposed. Based on the apposition and hyponymy extension of ontological terms related to function and flow, a process knowledge retrieval model aiming for innovative design, along with a prototype system, are established by means of the extended algorithm, semantic retrieval, and word segmentation.

**Key words:** manufacturing planning design; innovation approaches; ontology; knowledge model

## 0 前言

工艺是连接产品设计和制造的桥梁,是制造系统的重要环节,知识则是其创新设计的前提和保障。在绿色制造背景下面向工艺过程、工艺要素和工艺方案增强产品制造周期的经济、社会效益协调优化迫在眉睫。现有工艺设计主要面向过程管理及制造

方式进行研究,对知识如何影响工艺、激发创新思维却研究不足。面对工艺设计模糊性、不确定性、经验性、跨领域等特点,迫切需要系统化地研究和利用工艺创新设计领域特点、知识范围,借助计算机辅助平台,在工艺设计过程为设计者和生产者提供创新支持。

工艺创新设计是以设计为驱动包括新装备、新技术和新组织管理模式在内的工艺变革,现有研究从管理学及设计制造领域涉及工艺创新设计,其中 MUSTAFA 等<sup>[1-4]</sup>多以企业为主体研究其工艺创新

\* 国家自然科学基金资助项目(51175357, 51435011)。20160711 收到初稿, 20161023 收到修改稿

组织模式,张再利等<sup>[5-6]</sup>建立了工艺创新设计模型,王刚锋等<sup>[7-8]</sup>从设计流程的角度研究工艺创新。GUO等<sup>[9]</sup>已结合产品竞争力模型及存在-表达模型的特点进行需求挖掘,构建出符合工艺创新要求的工艺设计流程。在此基础上需要对工艺规范知识激发工艺设计师的创新思维进行研究。

工艺创新设计是复杂的知识决策过程,其繁杂、隐含、多样、动态等特征让领域知识挖掘、保存和重用受到了局限。现有基于知识的工艺创新设计的研究,多分别集中在知识的获取、分类<sup>[10]</sup>、表达<sup>[11-12]</sup>、组织<sup>[13-14]</sup>等,但基于工艺目标对运用知识激发创新思维的支持不足。知识检索上国内外将本体应用于信息检索的研究,主要基于网络代理搜索本体和基于本体的分布式结构化信息获取<sup>[15-16]</sup>、理清工艺知识领域概念和术语的层次关系<sup>[17]</sup>。

在现有研究基础上,对工艺创新设计领域知识以“功能+流+案例”为规则完成功能本体分类并将其本体化层次表达,构建基于本体的知识管理逻辑架构和知识语义模型,搭建检索模型并将原型系统运用于工艺创新设计流程。

## 1 支持创新的工艺设计知识构成

工艺知识是人们在工艺设计生产中获得的认识和经验的总和,本研究需要搞清如何表达以及如何高效使用两个问题,其关键内容包括知识概念、分类和表达。本研究所涉及知识其范围是一个包含工艺领域、跨学科范围的大知识源,涵盖科学效益、集成类知识与其他领域知识。其主要内容包括原理、经验、规范、过程、模型、试验(检测)以及案例。

### 1.1 工艺设计目标及其来源

工艺设计知识服务于工艺目标。工艺设计目标

是指设计和生产者在生产和设计过程中受用户需求、设计信息、企业要求、社会环境和服务指标等多因素制约而产生的对工艺的需求。在考虑时间(Time)、质量(Quality)、成本(Cost)、服务(Service)和环境(Environment)五个目标之外,工艺人员应建立产品生命全周期观念,与设计者进行协同设计:①来自用户的工艺需求,主要包括产品的质量品功能、性能、外观、价格等;②来自设计信息的工艺目标,主要包括设计者、产品零件图和设计说明书三方面;③来自企业内部的工艺目标,围绕降低加工成本、减少工时和物料消耗、改善工作环境、操作安全等方面展开;④来自社会环境的工艺目标,包括减少污染、使用新材料、采用新工艺等;⑤来自服务能力的工艺目标,主要是指工艺系统满足特殊工艺需求的能力,它决定了矛盾冲突解决的效果和工艺创新的程度。工艺创新设计全周期包括需求获取、组织表达、需求评价、需求转换、方案生成以及后续过程,期间需要TRIZ进行工艺技术推动,需要AHP、QFD等方法进行评价与转换,针对不同环境所需要的工艺知识内容与范围也是不一样的。

### 1.2 面向创新设计的工艺知识构成

创新设计作为解决问题的保障,能系统化地引导、激发设计师的创造性思维、逻辑思维、发散思维、收敛思维与形象思维。工艺设计创新可分为原理构想与方案实施两个阶段,其知识需求有所区别:原理构想关键是功能求解,功能知识能有效突破思维壁垒;方案实施涉及面广,需要以跨领域知识及工艺案例知识作为参考。

构建如图1所示的面向工艺目标和创新设计的工艺知识构成要素,以功能知识为核心,将与其相关的作用类知识、流类(物体&场)知识、案例类知识作为构成要素,运用于后续模型搭建。其中,功能

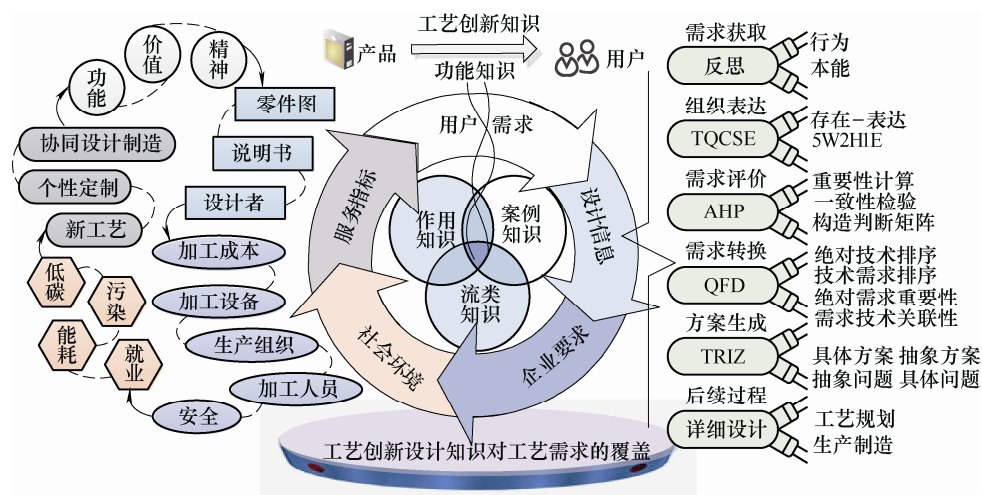


图1 基于工艺目标的工艺知识构成要素

是对设计要求的抽象,作用说明其实现功能的机理,而案例则描述了作用于原理的典型工艺方案。这样可有效弥补工艺设计知识零散、关联性弱、重用不强等问题。

## 2 工艺知识的组织与逻辑框架

由于工艺知识大都由工艺专家根据经验或人工获取的,受经验、技术等较多不可控因素的影响,其存在形式是复杂多样的,为了能有将工艺知识统一表达,选择使用本体表示方法对其进行管理。具有以下三个优点:其一是利用本体对工艺领域概念、属性、概念间关系与公理等以规范化和形式化模式表达;其二是利用同义与层次关联建立信息网,是知识迁移和跨领域思维的创新前提;第三是解决由于表示不一致而造成的信息冲突,让异构信息合理化表达。本体语言能让计算机理解并执行本体,其中 Protégé 使用最为广泛,可提供用户交互的本体开发环境与可视化界面,基于 Protégé 进行本体的构建,并以 OWL 形式进行输出。

工艺设计知识包含复杂的概念、方法、经验和设计结果等资源,运用本体可对知识源和知识类型进行描述,搭建工艺资源间的关联,并提出如图 2 所示的基于本体的设计知识组织模型。它主要由知识资源库层(A)、本体层(B1)、元知识层(B2)、应用层组成,其中:知识资源库层涵盖了推理规则、领域知识、实例、集成知识、原理知识、创新方法在内的各类知识;本体层以形式化方式对领域内概念间语义关系进行表达;元知识层负责对知识资源库中的资源一对一映射并进行表达;应用层则可将以标准化表达的知识进行检索、推理、运算及维护。

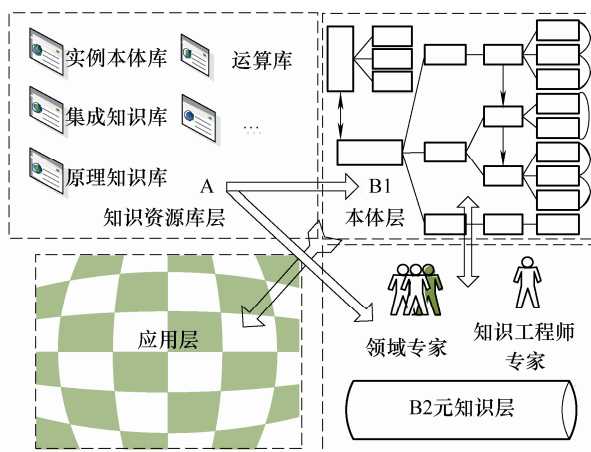


图 2 工艺设计知识组织模型

## 3 基于本体的工艺知识本体构成

### 3.1 知识本体表达方法

运用 PEREZ 等人的五元素法对工艺创新知识进行描述,归纳出本体的 5 个知识表示原语。表示式为

$$ontPK=(ontC, ontR, ontF, ontA, ontI) \quad (1)$$

式(1)中为工艺设计知识本体,由概念  $ontC$ 、关系  $ontR$ 、函数  $ontF$ 、公理  $ontA$  和实例  $ontI$  五个集合构成。 $ontC$  既是知识概念的集合也是对象的集合,涵盖功能、科学效应、作用原理和实例等工艺知识,按照框架结构、通过类进行定义。 $ontR$  可在形式上定义为  $n$  维笛卡尔积的子集:  $R: C_1 \times C_2 \times C_3 \times \dots \times C_n$ , 作为连接概念间的纽带,具有继承关系、整体与部分的关系、同义词关系、实例关系、属性关系、同属关系、分离关系等基本关系。 $ontF$  可定义为  $F: C_1 \times C_2 \times C_3 \times \dots \times C_{n-1} \rightarrow C_n$ , 表示关系中前  $n-1$  个要素可唯一决定第  $n$  个要素。 $ontA$  亦是永真式的集合,可约束于  $ontR$  与  $ontF$ 。 $ontI$  是属于某个概念的实体集合,在语义中实例表示的就是对象。

本体构建的方法在参照骨架法、Methontology 方法、斯坦福大学“七步法”<sup>[18]</sup>等方法后确定为目标确定、本体分析以及本体评价三个步骤,具体可分为:确定工艺知识本体的专业领域和范畴、考查复用现有工艺知识本体的可能性、列出工艺知识本体中的重要术语、定义类和类的层次结构、定义类的属性、定义属性的分面以及创建实例。

### 3.2 面向创新设计的工艺知识本体构成

前文提到工艺设计是面向功能开展的,以本体形式列举出各子本体中的术语,定义其中概念,并以工艺知识特征分类,自顶向下构建工艺设计知识概念分树。功能本体在 Hansen 扩展动宾词法(动词+名词+{限定词组})基础上以“功能动词+流”形式进行表达,结合工艺特点建立了描述功能动词的作用本体以及描述对象的流本体,如图 3(左)所示。工艺系统基本作用可分为分支、控制、导向、连接、转换、检测、供应和支撑八类,以分支为例可分为包括切割的分离属性,包括研磨的精制属性以及包括扩散的分发属性。

对于流本体将其细分为抽象流本体、工件特征本体以及制造资源本体,如图 3(右)所示。其中制造资源本体以用途划分包含工艺资源与硬件资源,它们构成同位关系。工件特征本体包括工件几何与工艺特征,几何特征是指孔、轴、螺纹等主要特征以

及退刀槽、沉头等辅助特征,工艺特征包括尺寸精度、形状精度、热处理等。抽象流本体是工艺活动所有物理要素的集合,包括实体、信号和能量三类,本体构建需按工艺设计领域特征进行扩展和领域标

准化。除此以为还需构建基于创新方法的工艺案例本体,如图4(左)所示。内容包括索引摘要、问题描述、方案描述等,囊括了TRIZ、物-场模型等创新方法以及技术、物理等冲突解决案例。

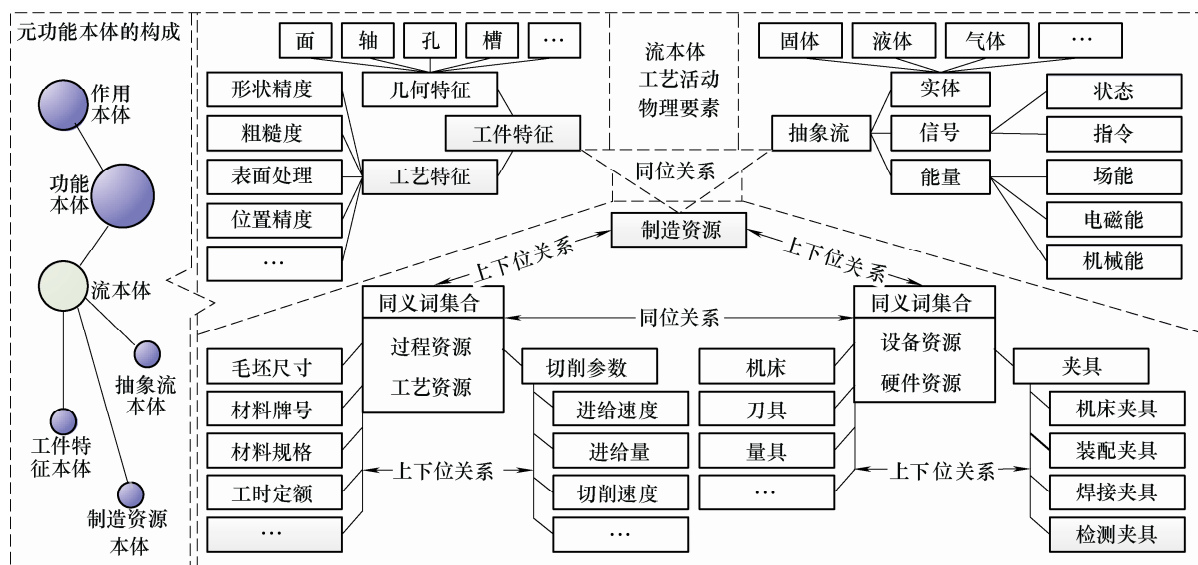


图3 功能本体及流本体层次结构

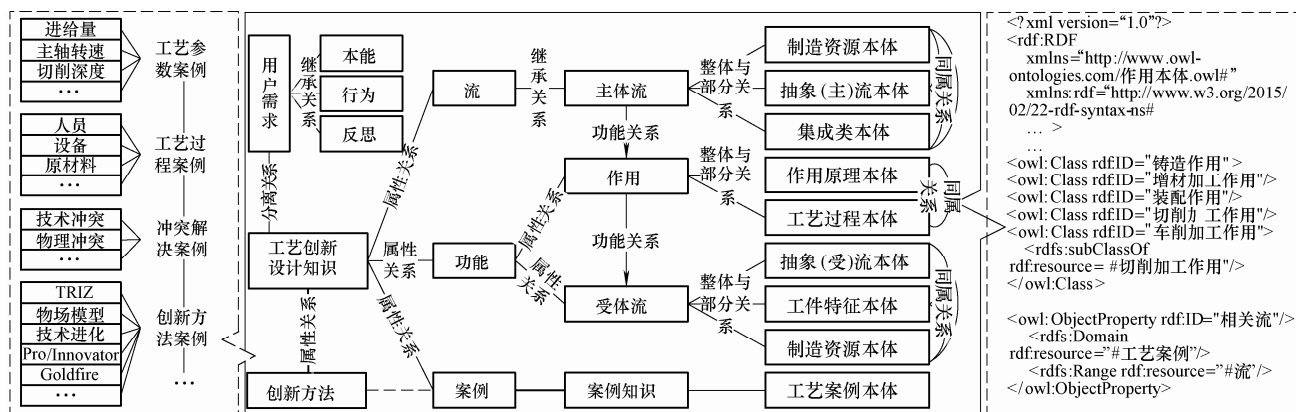


图4 面向创新的工艺设计知识语义模型及OWL代码

### 3.3 工艺知识语义模型构建

在明确了工艺创新知识本体对象及概念集后,基于用户需求和工艺特征建立了如图4(中)所示的工艺设计知识语义模型,包括主体流、作用、受体流和案例等4项本体,其中矩形为知识类、箭头为语义关系。通过Protégé-OWL Plugin生成OWL文件,在保证其本体构建标准化的基础上有助于建立知识推理引擎,图4(右)截取了部分本体描述。

## 4 工艺设计知识模型构建及检索方法

### 4.1 构建面向创新设计的工艺知识模型

知识的建模和入库是相关设计知识输入、推理和输出的过程,如图5所示面向创新设计的工艺知

识系统构建由工艺知识组件任务向导、知识组件引擎、本体库、知识库和求解器组成。任务向导保证每个模板独立运行管理,知识组件引擎在本体构架基础上抽取特征词项,由领域专家按“主体+作用+受体”形式组织,以自然语言形式表达知识文档对应的属性特征,由知识工程师及专家对上述知识进行审核形成最终的工艺设计知识。知识库为引擎提供智能设计方法及工艺设计对象数据。求解器对知识组件应用过程中所应用程序进行集中管理。

### 4.2 工艺知识分级检索模型

工艺知识的搜索及推理是支持工艺设计师实现创新设计的重要保障,为了实现检索内容准确表达、动态查询,解决表达差异、词汇孤岛、信息爆炸等问题,满足相关性(精确)和创新思维启发性(跨



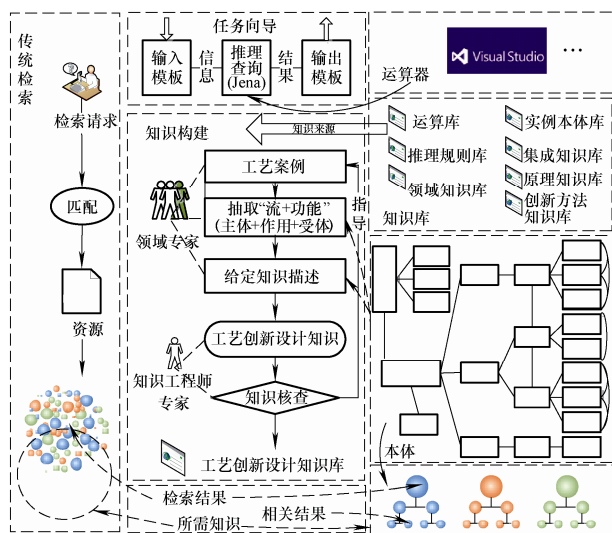


图5 面向创新设计工艺知识系统构建流程

领域且相关)等要求,以自然语言形式进行检索请求,利用分词、本体关系扩展和内容匹配等手段进行工艺知识检索。检索流程以知识资源库为底层支持,本体库为基础,为文本抽取、语义标注、检索

处理提供对应知识。专家及工艺设计人员将工艺隐性知识显性化,并利用语义标注工具提取信息形成实体存入元知识库,从而建立映射关系。分级建设模型如图6所示,当技术系统出现技术或物理矛盾时,系统将其转化为功能描述,问题的语义解析,如关键词“金属表面抛光”,语义解析为V+P+O概念集“抛光、表面、金属”。以本体论进行语义、类属等进行同义及上下位关系等三种扩展查询。模型采用分级知识检索,利用HP实验室开发的Jena的推理引擎派生出模型未明确表达的其他语句,以SPARQL为本体查询语言,以MySQL为后台数据库,进行本体推理和元组返回,结合“文档—实例关联表”进行知识匹配,实现创新设计要求。图6(右)是一个推理器实例代码片段。与传统检索方式相比检索查全、查准率较高,利用分词、概念匹配等检索方式进行预处理,其结果在检索请求内容之外,还可提供与之相关的知识,以辅助设计者创新设计和寻找答案。

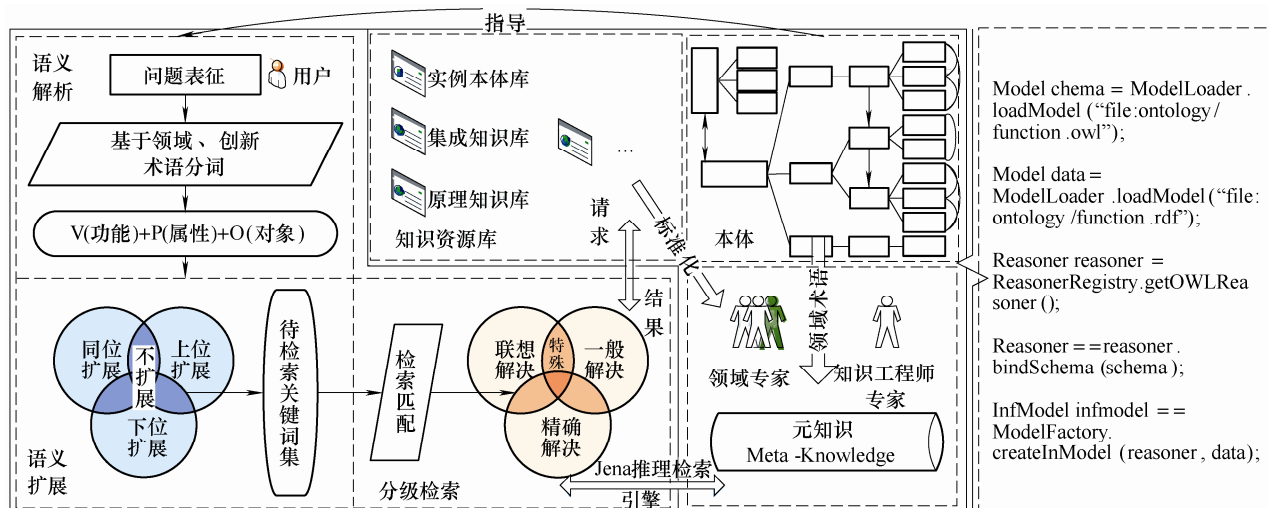


图6 面向创新设计的工艺知识分级检索模型

在上述关于金属表面抛光问题案例中,在进行VPO分词后将进行基于上下位、同位扩展的关键词检索,在实际设计中检索范围常局限于磨削、切削等机械加工方式,创新常来源于提高模具质量、改进研抛液粒度等方式,但经过上位扩展,系统会给出电化学抛光、化学抛光及机械抛光等方案,利用创新方法案例检索,系统会列举出类似于“等离子抛光金属表面的工艺方案”等案例:等离子体表面处理仪是通过利用对气体施加足够的能量使之离化成为等离子状态,利用这些活性组分的性质来处理样品表面,从而实现清洁、改性、光刻胶灰化等的目的。经过描述和工艺人员筛查,在解决问题的同时有助于其利用跨领域知识实现创新。

### 4.3 工艺设计知识原型系统

有效利用知识解决工艺创新问题,开发面向创新设计的工艺知识库原型系统尤为重要,实现前文所提功能,需要以C/S与B/S结构相结合的模式,选择SQL Server作为首选数据库,基于Windows操作系统框架,将JSP/Javabeen/Tomcat+Servlet+SQL Server2014作为具体实现的载体,并加以Java数据库连接(Java Data Base Connectivity, JDBC),采用SmartUpload技术保障知识顺利上传。本系统包含后台管理支持、用户认证、检索及反馈、知识显示、报告生成5个主要模块,工艺知识的树形目录和检索模块是创新设计的主要支撑。其中知识检索具有语义及精确检索两种模式,既可利用同位与上

下位关系检索也可进行关键词匹配。以创新方法、功能、流及案例作为索引项目,实现索引项目之间横向与纵向的联想。图7所示为知识语义检索英文界面。

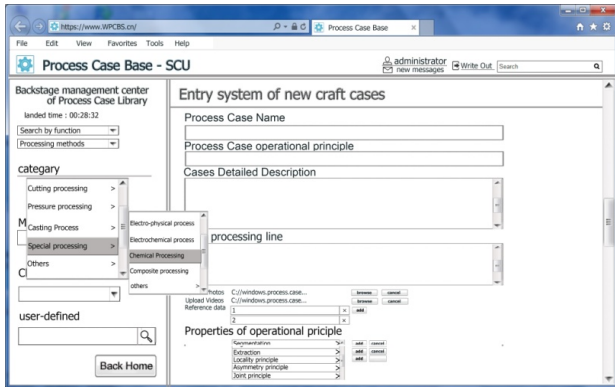


图7 工艺知识语义检索界面

## 5 结论

为扩展创新设计知识空间,提出了面向创新设计的工艺设计知识模型及检索方法。可总结为两个方面。

(1) 工艺创新设计需要基于工艺知识,从工艺设计目标、工艺知识构成及其领域范围入手,完善基于本体的工艺知识逻辑体系、知识本体表达以及语义模型,能够有效管理工艺知识,建立知识间联系。

(2) 在分析科学原理知识内涵的基础上,对功能、流本体进行了扩展,搭建了支持创新的工艺设计知识模型、分级检索模型以及原型系统。

面向创新设计的工艺知识半自动化运用是研究的发展趋势,如何基于用户需求和工艺创新设计一般模型,运用工艺知识辅助设计过程,是下一步研究的重点。

## 参 考 文 献

- [1] MUSTAFA B A, ERCAN Ö, MEHMET E A, et al. A quantitative approach for measuring process innovation: A case study in a manufacturing company[J]. International Journal of Production Research, 2013, 51(11): 3463-3475.
- [2] FURNSINN S, GUNTHER M, STUMMER C. Adopting energy flow charts for the economic analysis of process innovations[J]. Technovation, 2007, 27(11): 693-703.
- [3] CHAI K H, GREGORY M J, SHI Y S. An exploratory study of intrafirm process innovations transfer in Asia[J].

IEEE Transactions on Engineering Management, 2004, 51(3): 364-374.

- [4] SHALINI K. Innovation-supportive culture: The impact of organizational values on process innovation[J]. Journal of Operations Management, 2007, 25: 871-884.
- [5] 张再利. 面向工艺设计的创新设计研究[D]. 成都: 四川大学, 2008.
- ZHANG Zaili. Research on innovative design faced to process design[D]. Chengdu: Sichuan University, 2008.
- [6] 向愿. 工艺创新设计初步研究[D]. 成都: 四川大学, 2009.
- XIANG Yuan. A preliminary study on process innovation design[D]. Chengdu: Sichuan University, 2009.
- [7] 王刚锋, 田锡天, 耿俊浩. 支持工艺创新的工艺专利分类方法研究[J]. 机械制造, 2015, 53(1): 1-4.
- WANG Gangfeng, TIAN Xitian, GENG Junhao. An investigation on classification methods for process patents in encouragement of process innovation[J]. Machinery, 2015, 53(1): 1-4.
- [8] WANG Gangfeng, TIAN Xitian, GENG Junhao, et al. A knowledge accumulation approach based on bilayer social wiki network for computer-aided process innovation[J]. International Journal of Production Research, 2015, 53(8): 2365-2382.
- [9] GUO Xin, WANG Jie, ZHAO Wu, et al. Study of medical device innovation design strategy based on demand analysis and process case base[J]. Multimedia Tools & Applications, 2015, 19(2): 1-15.
- [10] HELGOSON M, KALHORI V. A conceptual model for knowledge integration in process planning[J]. Procedia Cirp, 2012, 3: 573-578.
- [11] MAREE M, BELKHATIR M. Addressing semantic heterogeneity through multiple knowledge base assisted merging of domain-specific ontologies[J]. Knowledge-Based Systems, 2014, 73(1): 199-211.
- [12] CHEN Wanling, XIE Shane, ZENG Fenfang, et al. A new process knowledge representation approach using parameter flow chart[J]. Computers in Industry, 2011, 62(1): 9-22.
- [13] CHUNGOORA N, YOUNG R. Semantic reconciliation across design and manufacturing knowledge models: A logic-based approach[J]. Applied Ontology, 2011, 6(4): 295-315.
- [14] HUANG Rui, ZHANG Shusheng, XU Changhong, et al. A flexible and effective NC machining process reuse approach for similar subparts[J]. Computer-Aided

- Design, 2015, 62(C) : 64-77.
- [15] AHMED S. Encouraging reuse of design knowledge: A method to index knowledge[J]. Design Studies, 2005, 26(6): 565-592.
- [16] 黄敏, 赖茂生. 语义检索研究综述[J]. 图书情报工作, 2008, 52(6) : 63-66.
- HUANG Min, LAI Maosheng. Survey of semantic search[J]. Library and Information Service, 2008, 52(6): 63-66.
- [17] 赵应秋. 基于本体的语义检索模型的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- ZHAO Yingqiu. Research of semantic retrieval model based on ontology[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [18] 陈文伟, 陈晟. 知识工程与知识管理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- CHEN Wenwei, CHEN Sheng. Knowledge engineering and knowledge management[M]. Beijing : Tsinghua University Press, 2010.
- 
- 作者简介: 郭鑫, 男, 1989 年出生, 博士研究生。主要研究方向为计算机辅助设计与制造。
- E-mail: gxiou89@foxmail.com
- 赵武(通信作者), 男, 1968 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为创新设计与智能制造、企业信息化与系统集成。
- E-mail: zhaowu@scu.edu.cn