

文章编号:1001-9081(2009)05-1456-05

基于经验反馈模型的模具企业知识获取框架

胡 沙,杨双荣,李建军

(华中科技大学 材料成形及模具技术国家重点实验室,武汉 430074)

(hbbusha@yahoo.cn)

摘 要:针对模具企业知识集成过程中出现的经验知识提取困难等问题,提出了基于经验反馈模型的知识获取框架。研究了面向模具生命周期的知识获取方法,实现了基于本体的知识提取和表达,采用概念图对经验进行可视化建模,并使用 Web 本体语言(Web Ontology Language,OWL)对知识进行统一的描述与存储。阐述了该框架的结构与运行原理,并在此基础上实现了基于面向服务架构的模具企业集成平台知识获取服务。该框架满足模具企业设计制造经验性强等特点,采用符合业务流程的知识获取过程和可视化经验表达方法,降低了知识获取的难度和成本。

关键词:模具企业;经验反馈;知识获取;本体;概念图;Web 本体语言;面向服务架构

中图分类号: TP182;TP391.7 **文献标志码:** A

Knowledge acquisition framework based on experience feedback model for die and mold enterprise

HU Sha, YANG Shuang-rong, LI Jian-jun

(State Key Laboratory of Material Processing and Die and Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: Concerning the difficulties of experience knowledge acquisition during knowledge integration process of die and mold enterprises, a knowledge acquisition framework based on experience feedback model was proposed. First, the knowledge acquisition method based on mold product lifecycle was studied and the Ontology-based knowledge extraction and representation were realized, conceptual graph was adopted to construct visual modeling and Web Ontology Language(OWL) was used to describe and store knowledge in a uniform way. Then, the structure and the runtime principle were stated. Finally, the knowledge acquisition services of mold enterprise integration platform based on service-oriented architecture were implemented. As the proposed framework satisfies the experience characteristics and adopts streamlining knowledge acquisition process and visualization representation methods, the difficulties and the costs are reduced.

Key words: die and mold enterprise; experience feedback; knowledge acquisition; Ontology; conceptual graph; Web Ontology language; service-oriented architecture

0 引言

随着模具产品设计复杂程度的提高,要求企业能够根据复杂多变的产品需求,联合运用多种专业领域知识,合理地安排生产资源,控制模具的质量和成本。知识集成能够从企业积累的信息和经验中提取知识,并建立集成的知识系统,提高企业已有知识资源的利用率,从而提高设计和生产效率^[1]。因此,知识集成已经成为加快知识资本化,满足企业知识共享与重用需求,促进企业创新和可持续发展的重要手段。

在知识集成过程中,最重要与核心的内容就是领域知识的获取,知识在获取方面存在很多困难^[2]。文献[3]提出的基于本体的企业知识集成框架中采用动态工作流的方式去收集业务流程中产生的知识,比较适合于以业务为导向的企业,但难以解决制造行业的经验知识获取问题;文献[4]采用本体重构和映射技术进行知识提取和本体构建,能够较好地实现结构化数据知识(如数据库表和 XML 文档)的提取,但对于非结构化数据如设计文档、工艺手册等如何处理尚未涉及。由于模具制造过程具有经验性和多变性等显著特点,导致模具企业经验和知识分散,难以进行有效的积累;同时由于模具

企业的信息化基础相对薄弱,知识以非结构化文档和经验为主,加大了知识获取的难度,因此有必要建立统一的知识获取框架,将隐性知识高效地转化为显性知识,并实现对非结构化经验知识的提取,帮助企业实现知识集成的目标。

针对模具企业经验知识密集的特点和知识获取与重用的需求,本文提出一种基于经验反馈(Experience Feedback,EF)模型的知识获取框架。该框架采用经验反馈模型及其方法指导经验知识的捕获、形式化表达、提取和总结,同时结合模具生命周期过程,使知识获取过程更加符合企业业务流程,降低了成本;以统一的本体描述语言对知识进行描述,使知识具有完备的逻辑基础并且易于重用;采用面向服务架构实现异构系统和数据源的知识共享,最大限度降低了系统之间的耦合性,满足了模具企业对知识获取的需求。

1 面向模具生命周期的经验反馈模型

通常的知识获取方法如 CommonKADS^[5]都是由早期的知识系统方法论衍生而来,它将知识系统的构建视作建模的过程。虽然该方法常被采纳为知识系统的构建标准,但对于中小型制造企业尤其是模具企业来讲有以下不足^[6]:1)高层

收稿日期:2008-11-18;修回日期:2009-02-08。 **基金项目:**国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAF01A43)。

作者简介:胡沙(1983-),男,湖北孝感人,博士研究生,主要研究方向:计算机集成制造、知识工程、模具 ERP; 杨双荣(1983-),男,广西桂林人,博士研究生,主要研究方向:模具 CAD/CAM、知识工程; 李建军(1964-),男,江西九江人,教授,博士,主要研究方向:模具 CAD/CAPP/CAM、计算机集成制造、网络制造技术、模具企业的优化生产管理。

次的抽象模型难于被理解与接受;2)较高的时间与人力成本;3)需要有专门的知识工程师帮助领域专家描述他们的知识;4)知识的提取与工作场景脱离;5)知识的维护与更新需要规律性的知识获取会议。

近年来,经验反馈作为知识管理的一种新思路,在制造企业业务活动持续改进和知识资本化方面扮演重要的角色^[7]。经验反馈是自底向上的方法,知识是从一些有用的案例逐渐构建起来的,这样不仅一些通用的知识能够被顺利的提取,一些不完全的知识也能够被保留下来。实际上,在数据、信息、知识这样的递进层次中,经验是处于信息与知识之间的形式。经验向知识过渡需要有三个步骤。首先是在信息层面描述事件(Event)和环境(Context);其次是在经验层面捕获分析(Analysis)和解决方案(Solution);最后就是在知识层面从以往经验推导出可行的方法、流程和规范等,从而达到知识重用的目的。总的来说,经验反馈方法的最大优势在于知识获取的过程与场景密切相关,使得知识具有实用价值。

B. Kamsu Foguem 等将经验反馈定义为“旨在将经验中获取的认识转化为显式知识的知识资本化与利用过程”,并提出了如图 1 所示的经验反馈过程的方法论^[6]。

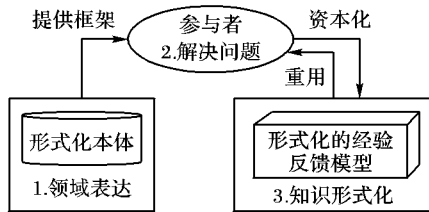


图 1 经验反馈过程方法

对于模具企业而言,经验的运用与工作场景密切相关。比如生产现场零件质检不合格的原因分析与处理意见,一般填写完单据或录入管理系统后,便直接开始后续加工,难以做到知识的提取与积累。通过经验反馈过程,领域本体(领域知识)被提升和强化,同时运用直观的概念图方式加以表达。该过程在不需知识工程师干预和特定环节进行知识提取的情况下,完成了经验的提取、调整与归纳,使得知识获取的过程与企业实际的设计生产流程相融合,最大限度地降低了时间和人力成本,从而将知识管理的收益最大化。

本文在概念模型的基础上,结合模具企业的业务特点,提出了面向模具生命周期的经验反馈模型(如图 2),该模型结合经验反馈过程方法与面向模具生命周期的概念分类,从两个不同的维度指导知识获取过程,并采用本体技术对知识进行统一的描述与存储。模型运作的过程相当于一系列预定义的业务活动,这些活动本身是为了解决在业务事件中出现的的问题,但同时又符合经验反馈的方法论。整个过程由以下四个步骤组成:

1)描述事件所处场景(Context)及事件(Event)本身,这是由任务的参与者完成的。在不需知识工程师的协助下,参与者能够借助概念图这种可视化工具完成相关信息的形式化,场景的描述有助于未来遇到类似问题时可以从经验库中提取相关的信息。

2)在领域专家(如设计部主管)的参与下,分析问题,形成专业的分析报告(Analysis)并提供解决方案(Solution),如能对以后的工作起到借鉴作用,则将其形式化描述。该步骤

的对应信息就形成了经验。

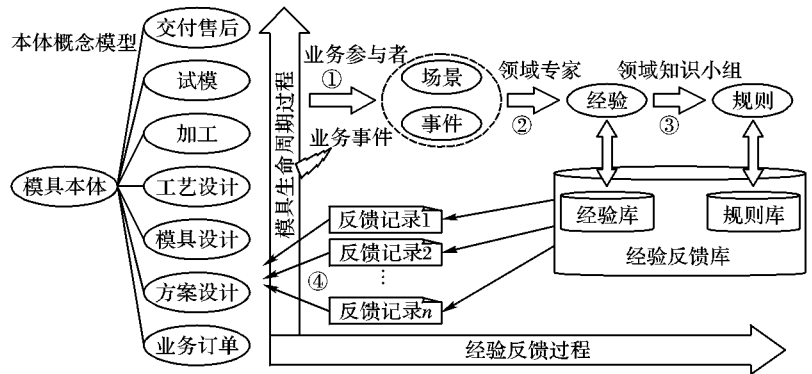


图 2 面向模具生命周期的经验反馈过程

3)对经验进行总结,形成规则或规范(Rules),以便能系统地该知识运用到未来类似的情形。为了建立这些规范,需要定义一个领域知识小组(一般由各部门主管和技术骨干组成)来处理某些特定的主题(例如修改模问题,质量事故频发等问题)。

4)将经验记录反馈给触发业务事件的模具生命周期阶段对应的本体概念模型,通过概念图到 OWL 的映射操作,完善并强化面向模具生命周期的概念模型用以更好地指导和规范经验反馈过程。

因此,该模型中的“经验”由四个元素组成:场景、触发事件、分析以及解决方案。由于事件所处的场景与概念模型密切相关,有必要建立一种完备且可扩展的知识分类方法来指导概念模型的。模具企业是典型的订单生产型企业,模具生产要经历订单确认、方案设计、模具设计、工艺设计、加工、试模、交付等几个阶段,每个阶段都会有知识的运用和创新,因此按照模具生产过程的方式对概念进行建模贴近企业员工的思维习惯,也符合模具企业的组织结构,便于部门内部经验的积累和知识的获取。建立面向模具生命周期概念模型的过程如下:

1)建立适合企业业务特点的生命周期阶段。由于模具企业类别以及生产组织、管理模式的差异,业务流程也不尽相同,所以必须根据实际的生产流程,结合部门组织结构,来抽象生命周期阶段。

2)以生命周期的基本阶段为单位,建立领域词库。该过程是迭代的过程,领域词库需要在企业实施的过程中不断的扩充与完善。

3)建立概念层次分类,运用概念分类树对领域概念类/子类、整体/部分、等价概念等关系进行建模。

4)在概念层次分类的基础上,定义类、属性及关系,这是构建概念图的基础,也是必须的步骤;同时也可以根据已有知识添加实例,或者由系统根据经验反馈记录自动化提取实例,是非必须步骤。

通过经验反馈过程和模具生命周期过程两个维度对知识获取建模,保证了知识的可靠性和完备性,为经验知识的表达与提取打下了坚实的基础。

2 基于本体的经验知识提取与表达技术

经验反馈系统的实质是一个包含经验性元素集合的知识库^[6],本文提出的知识获取过程目的就是为了不断地丰富经验性元素并使之易于使用。为了使这些知识能够被高效地获取并重用,不同的参与者必须共享一个公共的领域词汇表以

免造成歧义,而本体为在企业环境中建立一个可表示公共知识的、定义良好的、一致性的、可扩展的、可重用的概念知识模型提供了强有力的手段。在知识工程领域,最重要的本体定义是 Gruber^[8]给出的:本体是概念模型的明确的规范说明。Studer^[9]等对上述定义进行了深入的研究,认为“本体是共享概念模型的明确的形式化规范说明”。总之,本体的目标是获取、描述和表示相关领域的知识,提供对该领域知识的共同理解,确定该领域内共同认可的词汇,并从不同层次的形式化模式上给出这些词汇和词汇间相互关系的明确定义^[10]。因此本文采用本体理论与方法对经验知识进行形式化描述。

在经验反馈模型中,本体主要发挥三个方面的作用:

1) 沟通:本体为人员或公司之间提供了领域知识的共同的理解,从而减少了由于概念或术语造成的混淆,帮助人们更好的沟通与协作;本体为人们提供了直观的经验形式化表达方法,进而衍生成为经验交流介质。

2) 互操作性:通过本体所提供的语义化的概念定义,使得不同模型、范式、语言以及软件工具之间实现相互转化,尤其是通过语义匹配实现异构信息系统之间的集成与互操作性。

3) 推理与重用:通过本体的逻辑基础与推理机制,实现从已有的经验知识推导出新问题的解决方案,从而实现经验知识高效的重用。

目前用来形式化表达本体的语言有多种,概念图(Conceptual Graphs, CGs)知识表示语言能够完整地表达一阶逻辑和高阶逻辑,并且开发了一套直观的标记,非常适合业务参与者表达经验知识。Web 本体语言的子集 OWL-DL 是基于描述逻辑(Description Logics, DLs)变体 SHOIN(D)的本体描述语言,由于 OWL 基于 XML 的文档格式和丰富的形式化语义词汇,可以清晰地表达概念、角色、个体之间的关系,并且有完善的推理机制和成熟的开发工具(如 Protégé)加以支持,因此,本文采用概念图和 OWL 相结合的方式对知识进行提取和表达。

2.1 面向用户的概念图表达方式

概念图是一种用图的方式表示应用领域知识的形式化方法,可以定义为:

$CG = \{ Concept, Relation, F \}$, 其中:

Concept = {c1, c2, ..., cn} 是概念节点(Concept Nodes)的集合;

Relation = {r1, r2, ..., rm} 是关系节点(Relation Nodes)的集合;

$F \subseteq (Concept \times Relation) \cup (Relation \times Concept)$ 是弧的集合。

概念图以图形表示就是一种有向连通图,它包括两种节点:概念节点和关系节点,弧的方向代表概念节点和关系节点之间的联系。概念节点表示问题领域中的一个具体的或抽象的实体,关系节点表示概念节点之间的联系。在概念图中,概念节点用方框并表示,关系节点用椭圆表示,有向弧标出了关系节点所邻接的概念节点。例如:对于流动性差的塑料,如丙烯酸酯,分流道直径接近 10 mm。其对应的概念图如图 3 所示。

由此可见,概念图在表达经验知识的时候有较大的灵活性,这在保证强大的表达能力的同时也带来了复杂性,为此引入了通用概念图用以简化建模操作。通用概念图是在经验反馈模型的框架内,根据各模具生命周期阶段的特点,抽象和总

结出来的用以表达经验知识的模板。它为用户预先定义了一系列可选用的标签,并且提供了表达经验知识四要素(场景、事件、分析、方案)的图形骨架,并且用嵌套概念图的方式约定了这四者之间的关系,从而建立概念图建模的规范和准则。以试模阶段的为例,预定义的事件描述通用模板如图 4 所示,定义了试模阶段出现问题的几个关键要素,如反馈对象(产生试样缺陷的模具)和负面事件(缺陷的描述),以及试模的日期和操作人员信息。

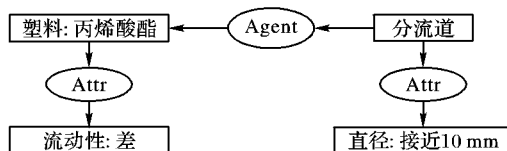


图 3 概念图表达注塑模分流道设计经验示例

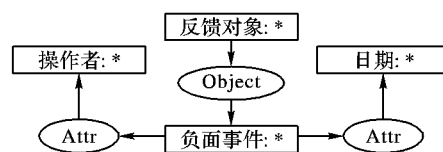


图 4 描述事件的通用概念图模板

为了完整地表达经验反馈的过程,提出了如图 5 所示的经验表达概念图,它由四个嵌套的概念图组成:“事件”属于某个特定的“业务场景”,并且需要通过领域专家的“分析”找到问题的根结,并且商讨出合理的解决“方案”。这四个方面相互影响与制约,以符合解决实际问题的思维过程,表达出经验反馈过程中的知识。

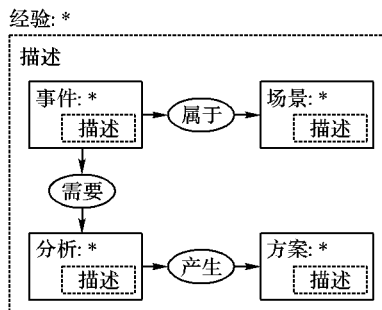


图 5 描述完整经验的通用概念图

2.2 面向系统的 OWL 表达方式

通过概念图的方式对经验知识进行提取之后,系统需要对其进行统一的解析与分布式存储,因此需要一种标准的本体语言既有较强的表达能力,同时兼顾推理功能,以实现智能检索和知识重用,而 OWL 正好满足这些需求。OWL 对于客观事件的描述主要从概念和属性两个方面进行,与其相应的描述手段是对象域(Object Domain)的方式和数据类型域(Datatype Domain)的方式。对象域的描述方式采用资源描述框架模板(Resource Description Framework Schema, RDFS)和 OWL 自身的语法进行,用于描述概念间分类化、层次化的继承关系以及相互间的关联关系;在进行数据类型域的描述时,OWL 支持 XML Schema 的所有数据类型进行概念属性的定义与表达。因此,OWL 通过对概念、概念属性及其相互间关系的描述,构成概念的复杂关系网络^[10]。

为了将经验知识统一描述为系统易于理解的 OWL 方式,需要将概念图模型映射到 OWL 语言,为此提出了一个基于 Java 语言的概念图到 OWL 的转换器,其基本结构如图 6 所示。

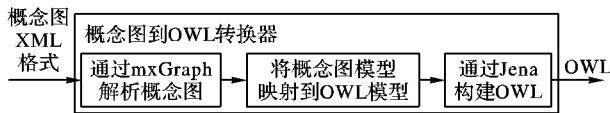


图6 概念图到OWL的转换器

其中 mxGraph 是由 JGraph 公司开发的基于 Web 图形工具体，先利用该工具将基于 Web 的概念图序列化为特定的 XML 文件并传给转换器，转换器通过 mxGraph 解析器分析中期的概念节点和关系节点，并根据预定义的映射规则转换为对应的 OWL 语义类型，最后借助惠普实验室开发的 Jena 工具包生成 OWL 文件，从而完成转换工作。转化器最核心的环节是模型映射的过程，它包含两个步骤：

1) 将概念节点和关系节点资源化。资源化的过程中为每个节点生成唯一的统一资源标识符 (Uniform Resource Identifier, URI), URI 应具有描述性和可访问性, 以便对其进行形式化表达和在企业范围内引用。

2) 建立基本的映射规则:

CG: Concept Node => owl: Class

CG: Relation Node => owl: ObjectProperty

CG: F 起始端对应的 Concept Node => rdfs: domain

CG: F 终止端对应的 Concept Node => rdfs: range

根据以上规则, 通过对概念图的遍历操作, 从而实现概念图到 OWL 的映射。

OWL 构建完毕之后, 需要依据描述逻辑对其进行推理。描述逻辑的推理功能集中在两个方面^[10]:

1) 归约 (Subsumption)。即判断一个概念是否为另一个概念的子集, 如判断“落料是否属于冲裁工艺”等, 主要概念的自动分类。

2) 相容 (Satisfiability)。即判断一个概念与已有的概念集是否相容, 主要用于进行概念集合的一致性检测。

本文使用本体建模工具 Protégé 构建的模具生命周期概念模型, 同时采用 Pellet 本体推理机来实现对 OWL 本体的推理, 并在此基础上提出了图 7 所示的 OWL 知识表达与推理过程。

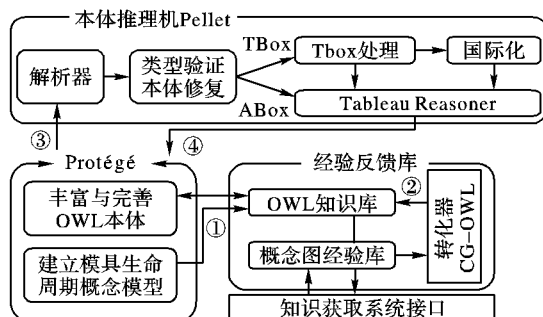


图7 OWL知识表达与推理过程

借助 Protégé 工具, 按照面向模具生命周期的概念模型创建过程, 建立基本的 OWL 本体, 其中包括经验反馈过程中所需的通用概念及关系 (通用概念图中的预定义标签), 通过步骤 1 存入 OWL 知识库; 通过步骤 2, 经验反馈过程获取的概念图借助转化器转化为 OWL 语言描述的知识; 通过步骤 3, Protégé 将 OWL 本体输入到 Pellet 推理机, 经过 Pellet 一系列处理之后, 经过步骤 4 将一致且分类完全的本体返回给

Protégé, 最终存入 OWL 知识库, 以供 SPARQL 的标准查询。总而言之, 系统是以 OWL 本体的方式来处理知识, 以提升系统效率和可扩展性。

3 模具企业知识获取框架

在建立面向模具生命周期的经验反馈模型的基础上, 结合基于本体的知识表达技术, 提出了图 8 所示的模具企业知识获取框架。该框架由四层组成, 即应用层、服务层、数据访问层和资源层, 并结合面向服务架构的核心组件企业服务总线来实现异构知识源的知识获取。

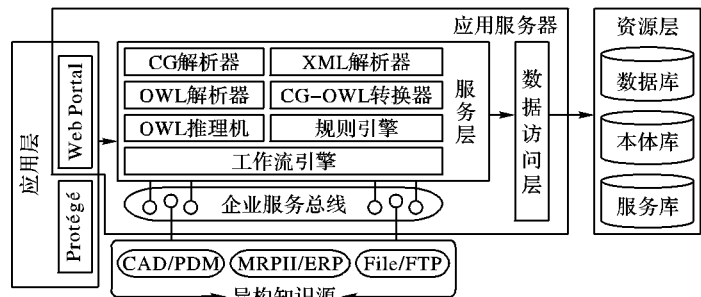


图8 模具企业知识获取框架

应用层: 该层主要以图形界面的形式为用户提供经验获取、本体建模和知识查询等方面的服务。其中 Protégé 工具主要面向知识工程师, 协助其建立基于 OWL 的模具生命周期概念模型以及维护和完善 OWL 本体库; Web Portal 则面向业务用户, 以浏览器的方式提供简便易用的概念图表达界面, 并融入日常的业务流程当中, 提取经验知识。

服务层: 该层提供和集成了知识获取的核心功能与组件, 为应用层提供计算支持。尤其是其中的工作流引擎, 一方面协调了服务层内部的其他各组件的运作过程, 另一方面也定义了经验反馈的工作流程, 使得业务参与者在经验反馈流程过程中, 清楚自己所处的环节以及要做的工作。

数据访问层: 该层抽象与封装了数据访问的操作细节, 简化了数据操作, 从而降低整个框架的耦合性。

资源层: 该层以关系数据库, 分布式文件存储等方式保存所有的经验知识, 同时保存一些与知识获取相关的元数据信息, 用以协调整个框架的运转。

为了支持异构环境下的知识获取、集成和重用, 本框架采用面向服务架构 (Service-Oriented Architecture, SOA), 将服务层的核心功能发布为 Web 服务, 连同外部知识源暴露出来的知识获取服务, 统一注册到企业服务总线 (Enterprise Service Bus, ESB), 通过服务的编排与组合, 实现松耦合的知识获取与集成。

4 应用实例

采用基于经验反馈模型的知识获取框架, 在“十一五”国家科技支撑计划项目“基于 SOA 的模具设计制造集成平台”的基础上, 实现了该知识获取系统原型, 并且作为知识集成子系统的核心功能, 为突破模具企业经验知识获取的瓶颈, 提供了新的方案。

该系统采用开源的 JBoss 应用服务器作为其运行环境, 并集成了针对模具企业多变业务特点开发的事件驱动型 ESB, 以满足经验反馈过程中事件捕获和数据交互的需要。

在服务层采用流行的 Spring 应用开发框架, 将 Jena 和 Pellet 的解析与推理功能抽象为统一的接口, 通过依赖注入的

方式加以整合,同时采用 JBoss jBPM 工作流引擎实现知识获取过程的流程化管理,并使用 JESS 规则引擎实现 OWL 的规则推理。

在数据访问层,采用 Hibernate 框架对关系数据库进行访问,以隐藏不同数据库访问的差异性。

资源层采用数据库与文件系统相结合的方式存储知识以及其元数据,提高访问效率。

在应用层采用 Web Portal 技术实现统一的用户界面环境。用户可以根据自己的权限及需求配置自己的操作界面,从而满足个性化交互需求,增强用户体验,图 9 所示的是基于 Portal 开发的经验反馈知识获取的 Web 界面,用户可从“个人工作列表”获取当前的经验反馈工作任务,启动任务后切换到“经验反馈建模”界面,通过拖拽的方式构建概念图模型,通过“经验知识查询”,可为其当前的工作提供经验支持。

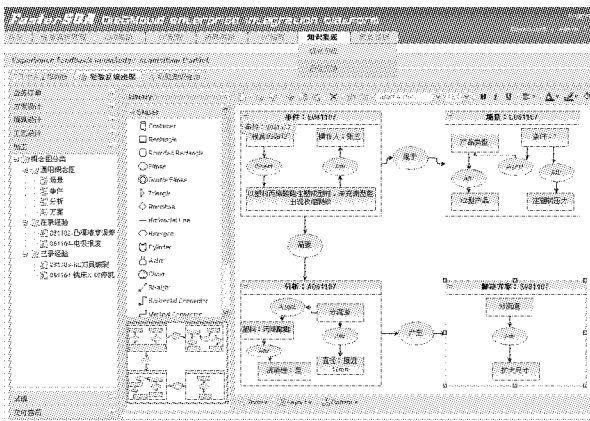


图 9 经验反馈用户操作界面

5 结语

本文提出了一种基于经验反馈模型的知识获取框架,结合本体技术和面向服务架构思想,以概念图的方式获取经验知识,并采用 OWL 语言进行统一的描述与表达,实现了符合实际业务流程的知识获取方案。该框架能帮助模具企业在较

为薄弱的信息化基础和较少的人力和成本投入的情况下,快速构建知识管理系统,为设计、工艺、修改模等经验性强、知识密集等环节提供智力支持,并有效积累和保护企业知识资源。由于历史原因,较多的知识存在于非结构的文档中(如 Word, PDF 等),从自然语言文本中提取知识,能极大提高知识获取的效率,因此经验反馈过程中自动化的非结构化文本文档本体构建技术有待于进一步研究。

志谢 感谢 JGraph 公司的 David Benson 为本项目提供了 mxGraph 的教育版许可。

参考文献:

- [1] 凌玲. 基于本体论的知识集成方法的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [2] 车君华. 机械产品设计过程知识获取与处理技术及其在叉车行业应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [3] HUANG NING, DIAO SHI-HAN. Ontology-based enterprise knowledge integration[J]. *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*, 2008, 24(4): 562 - 571.
- [4] 倪益华, 顾新建, 吴昭同. 知识集成的本体理论和框架研究[J]. *中国机械工程*, 2004, 15(21): 1954 - 1957.
- [5] KINGSTON J K C. Designing knowledge based systems: the CommonKADS design model [J]. *Knowledge-based Systems*, 1998, 11(5/6): 311 - 319.
- [6] FOGUEM B K, COUTERT T, BELER C, et al. Knowledge formalization in experience feedback processes: An Ontology-based approach [J]. *Computers in Industry*, 2008, 59(7): 694 - 710.
- [7] PANETTO H, MOLINA A. Enterprise integration and interoperability in manufacturing systems: Trends and issues[J]. *Computers in Industry*, 2008, 59(7): 641 - 646.
- [8] GRUBER. A translation approach to portable Ontology specifications [J]. *Knowledge Acquisition*, 1993, 5(2): 199 - 220.
- [9] STUDER R, BENJAMINS V R, FENSEL D. Knowledge Engineering, Principles and Methods[J]. *Data and Knowledge Engineering*, 1998, 25(1/2): 161 - 197.
- [10] 宋炜, 张铭. 语义网简明教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.

(上接第 1455 页)

运算量也是相当可观的,因此快速、高效算法是软件接收机的核心。如何进一步减少 FFT 的运算次数从而减少运算量,同时利用 X86 系统的多媒体加速指令来实现接收机的并行加速引擎,是我们下一步工作的重点,也是目前 GPS 软件接收机信号处理的重点课题之一。

参考文献:

- [1] WON J-H, PANY T, GUNTER W H. GNSS software defined radio real receiver or just a tool for experts?[J]. *Inside GNSS*, 2006(7/8): 48 - 56.
- [2] SHARAWI M S, KORNIYENKO O V. Software defined radios: A software GPS receiver example[C]// *IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications: AICCSA '07*. Washington, DC: IEEE Press, 2007: 562 - 565.
- [3] KENT K, PREMAM M, CHAD C. A complete if software GPS receiver: A tutorial about the details[C]// *Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation ION GPS 2001*. Salt Lake City: Salt Palace Convention Center, 2001: 789 - 829.
- [4] TSUI J B Y. Fundamentals of global positioning system receivers: A software approach[M]. 2nd ed. New York: Wiley Series, 2004: 34

- 67.
- [5] AKOPIAN D. Fast FFT based GPS satellite acquisition methods[J]. *IEEE Proceedings Radar Sonar Navigation*, 2005, 152(4): 277 - 286.
- [6] LEDVINA B M, PSIAKI M L, POWELL S P, et al. Bit-wise parallel algorithms for efficient software correlation applied to a GPS software receiver[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2004, 3(5): 1469 - 1473.
- [7] AKOS D M, NORMARK P L, ENGE P, et al. Real-time GPS software radio receiver[C]// *Proceedings of the Institute of Navigation National Technical Meeting*. 2001: 809 - 816.
- [8] LEDVINA B M, PSIAKI M L, POWELL S P, et al. A 12-channel real-time GPS L1 software receiver[C]// *Proceedings of the Institute of Navigation National Technical Meeting*. 2003: 767 - 782.
- [9] LIN D M, TSUI J B Y. A software GPS receiver for weak signals [C]// *2001 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*. Washington, DC: IEEE Press, 2001, 3: 2139 - 2142.
- [10] BORRE K, AKOS D M, BERTELSEN N. A software-defined GPS and galileo receiver: A single-frequency approach [M]. Boston: Birkhäuser, 2006.