

# 面向实例推理的产品设计本体建模研究及应用\*

王生发 顾新建 郭剑锋 马 军  
(浙江大学现代制造工程研究所 杭州 310027)

**摘要:** 分析现有基于实例推理的产品设计系统, 针对其缺乏对实例功能、行为等描述的缺点提出面向实例推理的产品设计本体模型, 并利用本体技术建立基于实例推理的产品设计实例本体及产品设计实例本体模型。依照产品设计特点研究产品设计实例本体模型的重要性质, 依据实例推理的产品设计给出基于本体的产品设计实例本体检索机制。在检索中利用本体模型的 EDCOM 数组, 通过相似度算法进行匹配找出合适的产品设计实例, 在本体模型库维护中给出本体模型的集成算法。最后以汽车零部件企业为实例, 并利用本体技术开发了基于实例推理的产品设计原型系统, 通过设计系统的产品设计要求、检索实例等功能模块实现了基于实例推理的产品设计。

**关键词:** 基于实例推理 本体 实例检索 相似度  
**中图分类号:** TH122

## 0 前言

基于实例推理(Case-based reasoning, CBR)是一种基于以往经验的问题解决机制, 现已被广泛应用于多种智能领域, 如智能诊断、数据挖掘、图像识别等领域中, 特别是应用于产品的设计领域<sup>[1]</sup>, 据调查产品设计活动中大约有 75%左右的设计是基于实例的产品设计<sup>[2]</sup>。

在基于实例推理的产品设计中, 产品实例知识的表达是产品设计的重要方面, 对于产品设计起着重要作用。但是当前产品实例知识表达大都集中在产品结构, 即几何模型上, 缺乏进一步对产品功能、行为等的语义信息描述, 因此不能很好满足不同设计者对产品不同级别抽象的需要<sup>[2]</sup>。而本体作为知识的一种良好载体, 有很好的概念层次结构以及对逻辑推理的有效支持, 并且能从语义和知识层次上描述信息系统的概念模型, 因此本体很好地弥补了上述缺陷, 另外本体提供了形式化描述知识的基础, 能够实现产品实例知识的共享和集成。

在研究了现有的基于实例的产品设计基础上, 根据基于实例推理的产品设计原理, 利用本体表达产品设计实例的良好特性, 依照本体的概念建立了产品设计实例本体及其产品设计实例本体模型, 提出了基于实例的产品设计本体检索模型, 对于本体模型库的集成给出了相应的算法。最后以汽车零部件的电涡流缓速器设计为实例并利用本体技术开发了基于实例推理的产品设计系统。

## 1 基于实例推理的产品设计原理

基于实例推理的产品设计原理就是将经验(知识)按一定组织方式存储于实例库中, 通过检索实例库来得到相似实例, 再对其进行重用或经修正重用来获得当前问题的解<sup>[3]</sup>。

图 1 是基于实例推理的产品设计流程图, 其产品设计流程主要分以下几步进行。

- (1) 问题描述。基于实例的推理在很大程度上依赖于它所收集的产品实例, 为了有效地检索和重用, 需要确定每个产品实例的模型结构。
- (2) 实例检索。根据每个实例的问题描述特征, 对实际条件和实例进行相似性评估, 在实例库中检索并获取最相似实例和解决方案。
- (3) 实例修改。相似实例如果和实际要求存在差异, 就需要对实例进行修改, 以获得一个需求的产品模型。
- (4) 保存实例。把当前产品模型以及合理的解决方案作为一个新的实例保存到实例库中, 以便积累实例。

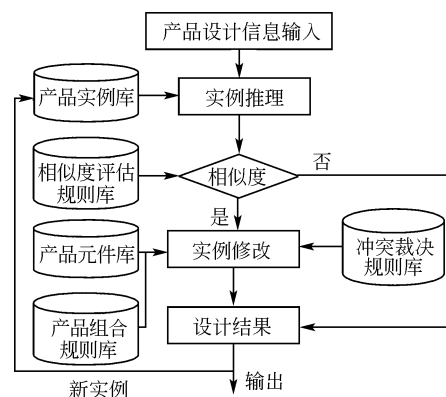


图 1 实例推理的产品设计流程

\* 国家自然科学基金(70501026)、国家科技支撑计划(2006BAF01A02)和国家高技术研究发展计划(863 计划, 2006AA04Z151)资助项目。20060529 收到初稿, 20061128 收到修改稿

## 2 产品设计实例的本体模型

### 2.1 本体论

本体论(Ontology)是一种概念化的说明,是对客观存在的概念及其关系的一种描述。从哲学意义上看,本体论关注的是“存在”,即世界在本质上有什么样的东西存在,或者世界存在哪些类别的实体,所以哲学上的本体论是对世界任何领域内的真实存在所做出的客观描述。本体(Ontology)的核心是一个领域内公认的概念实体的有限集合,领域内公认的语义信息通过概念实体之间的关联关系来表达。

定义1<sup>[4]</sup> 本体是一个四元组:  $Ont = (D, Con, Att, Ass)$ 。其中,  $D$  为本体应用的领域集,可以是单个领域,或者是多个领域的并;  $Con$  为领域  $D$  中的概念实体的有限集;  $Att$  为概念实体属性的有限集;  $Ass$  是概念实体之间的关联函数,如果两个概念实体存在关联,则函数值为 1, 否则为 0, 并且不存在孤立的概念实体,即不与其它概念实体发生关联的概念实体。

### 2.2 产品设计实例本体

本文分析了张东明等<sup>[5]</sup>的基于本体的设计知识建模、罗尚虎等<sup>[6]</sup>的产品配置本体以及王凤英等<sup>[7]</sup>的基于实例推理的产品概念设计系统后,通过对产品设计实例域的通用概念进行分析和抽取,建立了一个描述产品的设计实例本体。

定义2 产品设计实例本体是从工程的角度抽象与描述产品设计实例知识中的概念与关系,根据定义 1 产品设计实例本体可以定义为一个四元组:  $PDOnt = (PDD, PDCon, PDAAtt, PDAss)$ ,  $PDD = \{\text{产品设计实例域}\}$ 。

图 2 表示了产品设计实例本体(PDOnt)的概念实体(PDCon)、概念实体属性(PDAAtt)和概念实体关联(PDAss)等集合的具体内容。其中,概念实体主要包括本体根类型(conf)和直接派生的基本概念实体,新扩充的概念实体要从这些概念实体中继承。概念实体属性主要包括字符属性、数字属性、布尔属性等。概念实体关联集包括了各概念实体之间可能具有的关联关系,如 subclass\_of 描述部件的继承关系、comp\_of 描述部件的组成关系、func\_of 描述部件具有的功能关系等。

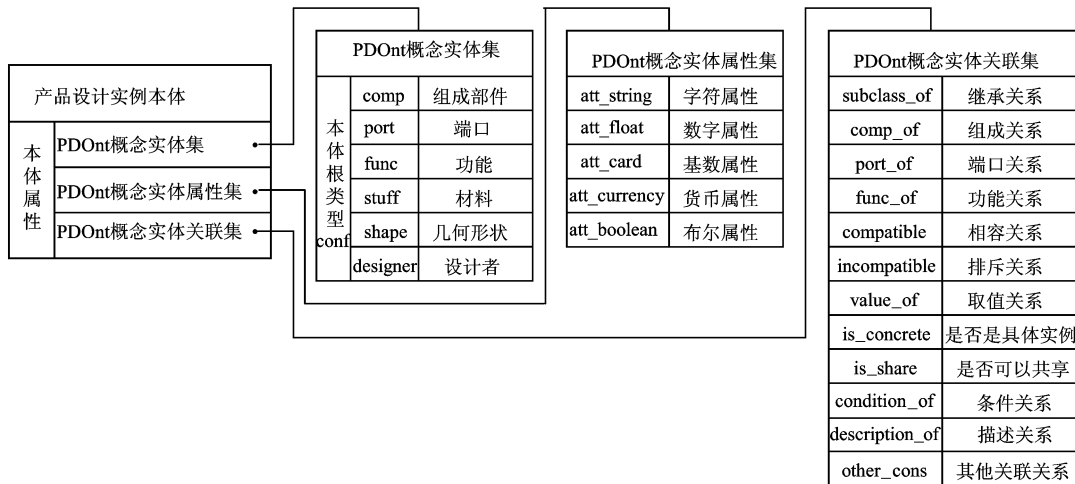


图 2 设计实例本体结构描述

为了利用产品设计实例本体构建产品设计实例本体模型,结合本体的性质,综合产品设计的特点,给出了产品设计实例本体的两个重要性质。

性质 1 对于某个概念实体来说,如果它是一个实体的组成部分,而这个实体又是另外一个实体的一部分,那么这个概念实体也是另外一个实体的组成部分。即

$$(\forall p1, p2, p3) \text{comp\_of}(p1, p2) \wedge \text{comp\_of}(p2, p3) \supset \text{comp\_of}(p1, p3)$$

性质 2 概念实体关联 comp\_of 关系是非自反的、非对称性的。即

$$(\forall p) \neg \text{comp\_of}(p1, p2) \text{comp\_of}(p2, p3) \supset \text{comp\_of} \neg(p2, p1)$$

按照产品设计实例本体的定义,根据产品设计实例本体的性质,通过对概念实体添加属性,按照概念关联集限定的关联关系相互交织,形成支持推理的、描述产品设计知识的复杂语义网络图。

### 2.3 基于本体的产品设计实例模型

定义 3 基于本体的产品设计实例模型(Product design case model, PDCM)是一个多重有向图:  $PDCM = (PDCV, PDCE, PDCR)$ , PDCV 和 PDCE 分别表示节点和有向边的集合,其中,节点由 PDCon

的概念实体构成,其有限集合为 PDCV。对于任意两个节点  $V1, V2 \in PDCV$ , 若  $PDAss(V1, V2) = 1$ , 则 PDCM 中存在一条由  $V1$  指向  $V2$  的有向边, 节点之间的有向边的有限集合为 PDCE,  $PDCR = \{reqspec\}$ , 是初始节点。

PDCM\_Net 是在产品设计实例空间上的实例化结果, 表示了产品设计实例中所有可能出现的组件及其相互关系。其中, 节点由 PDCCon 的概念实体构成。

基于本体的产品设计实例模型是产品设计实例本体语义网络在设计实例空间上的投影, 通过实例化概念实体, 添加概念属性及概念实体关联关系, 形成具有复杂语义关系的网状结构, 清晰地表达了产品设计实例知识, 该模型具有以下特点。

(1) PDCM\_Net 刻画了产品实例的统一表示框架, 提供了描述产品设计实例模型语义信息概念化表示, 可为设计领域所共享和重用。

(2) 在 PDCM\_Net 支撑下可满足不同设计问题

求解方法的信息需求, 具有较高的通用性。

(3) 通过引入概念实体、概念实体属性及概念实体关系, 增加了产品设计实例模型查询的灵活性。

产品设计实例本体模型在设计实例本体的驱动下, 使用统一的构架来表达产品设计实例, 从而有助于实现产品检索推理。通过使用统一的术语和概念, 减少了设计实例模型表达逻辑关系造成的误解, 设计实例本体模型支持功能需求和结构需求等多视图表达, 具有较强的灵活性。以电涡流缓速器产品为实例, 图 3 描述的是电涡流缓速器的产品设计实例本体模型(部分)。

在模型中用于表达电涡流缓速器是由转子、固定支架等部件组成, 转子、固定支架还可以继续细分, 此电涡流缓速器模型的输入电压是 24 V, 最大制动力矩是 2 600 N·m, 此缓速器对汽车的技术要求是行车制动室内径是 176 mm, 驻车室内径是 168 mm, 工作压力为 0.8 MPa。

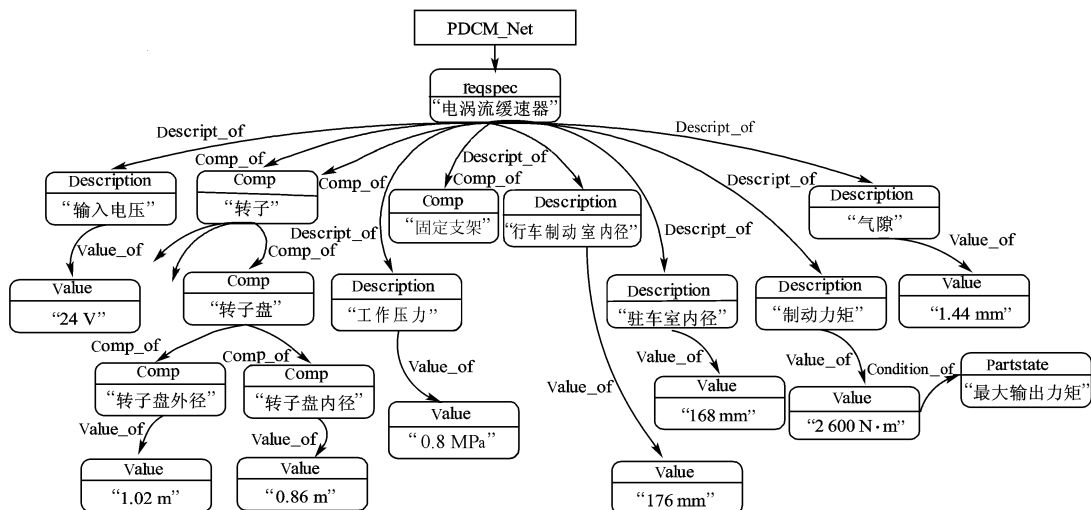


图 3 电涡流缓速器 PDCM(部分)

### 3 设计实例的本体模型检索

基于本体的产品设计实例模型检索的本质在于设计人员在产品设计时能够快速找到与输入条件匹配或近似的产品实例模型, 获取具有最佳相似度的产品实例<sup>[8]</sup>, 整个检索过程如下步骤。

(1) 用户向信息检索系统提出检索申请。

(2) 信息检索系统产生一个界面与用户交互。界面接收用户提出的查询关键字后, 系统查询本体模型库, 从中找出出现该关键字的各个领域, 然后将其领域以及在该领域下的关键字的含义罗列给用户。

(3) 用户此时可根据自己的意图, 在界面上确定所需查找的领域及含义。

(4) 系统将经过本体规范后的请求交给搜索引擎进行检索。

(5) 搜索引擎按照相似度检索后返回给用户检索信息。

#### 3.1 产品设计实例本体模型的 EDCOM 数组

在本文中产品设计实例本体模型表示为一个有向图, 这种系统能够支持比 Map 和 XML 格式更为复杂的事件, 为了方便对产品设计实例本体模型进行检索, 将实例本体模型的元数据放置在一个数组中, 称这个数组为扩展的产品设计实例本体模型数组。

定义 4 在产品实例模型基础上，根据类层次和属性层次结构，求出所有合法概念实体之间的有向边，并将它们放在一个数组中，称这个数组为扩展设计实例本体模型(Extended design case ontology model, EDCOM)数组。其中各数据按照从上到下的层次顺序进行排序，以便于检索。

定义 5 以顶点概念实体(初始节点)作为始发点，按照箭头方向从上往下的顺序数，那么有向边对应的数字就是该有向边在本实例本体模型中所处的层次。

当需要检索产品实例模型时，系统从所需模型的主顶点开始，按照广度优先的顺序，对图中的各有向边进行遍历，以使得图中所有有向边都能被遍历到，且仅被遍历一次。对于每个被遍历到的有向边，系统对其生成一个或多个如下形式的 EDCOM 五元组

$$\text{summ}(ik, q) = (\text{subject}(i), \text{meta-statement}(ik), \text{object}(k), m(ik), q)$$

称这个五元组为“带类型语句(typed-statement)”，其中  $\text{subject}(i)$  是有向边起点的 ID， $\text{meta-statement}(ik)$  是此语句所对应的有向边， $\text{object}(k)$  是有向边终点的 ID， $m(ik)$  表示该五元组在检索时所对应的权重，可根据该  $\text{subject}(i)$  对应的五元组多少及检索情况进行调整， $q$  表示相对于顶点从上向下所处的层数。

图 4 是一个产品实例本体模型及其 EDCOM 数组，在 EDCOM 数组中用 A、B、C、D、E 表示概念实体，P1、P2、P3、P4、P5、P6 表示概念实体之间的有向边， $m$  表示该有向边属性在对应概念实体检索时占有的权重。

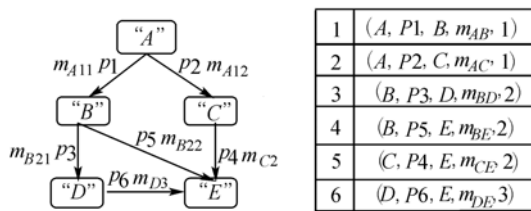


图 4 产品设计实例本体模型及其 EDCOM 数组

### 3.2 产品实例模型的检索机制

通过待检索产品实例与输入条件匹配，当某个检索实例产品与待检索产品实例的相似度大于某个值时可以作为检索到的实例，其中相似度越大说明这个产品实例模型越接近所需要的产品。

定义 6 设计需求产品在第  $q$  层的第  $i$  个概念实体的相似度  $I_i(C1, C2)$  是待检索产品实例模型的 EDCOM 五元组和检索实例产品模型 EDCOM 五元组的相似度， $I_i(C1, C2)$  可用下式计算

$$I_i(C1, C2) = m(i1) \times I_{\text{summ}(i1)}(C1, C2) + m(i2) \times I_{\text{summ}(i2)}(C1, C2) + \dots + m(in) \times I_{\text{summ}(in)}(C1, C2)$$

式中  $n$  表示对于  $\text{subject}(i)$  共有  $n$  个 EDCOM 五元组， $m$  表示五元组在检索时所对应的权重， $I_{\text{summ}(ij)}(C1, C2)$  表示待检索实例与检索实例对于此五元组的相似程度值。

定义 7 如果第  $i$  个  $\text{subject}$  共有  $n$  个  $\text{object}$  通过有向边与  $\text{subject}$  相连，那么这个  $\text{subject}$  的所有有向边  $\text{meta-statement}(ik)$  对应的 EDCOM 五元组在检索中的权重和满足  $\sum_{k=1}^n m(ik) = 1$ 。

定义 8 如果第  $i$  个  $\text{subject}$  与第  $k$  个  $\text{object}$  连接的有向边  $\text{meta-statement}(ik)$  对应的五元组的权重为  $m(ik)$ ，那么这个有向边对应的五元组权重在上一层次所反应的权重为  $m(ik) \times m((i-1)k)$ 。其中  $m((i-1)k)$  为  $\text{subject}(i)$  与上一层次  $\text{subject}(i-1)$  的有向边五元组所对应的权重。

在产品实例模型的检索中，检索图中以主顶点为起点的各有向边的五元组已位于待匹配的 EDCOM 数组库中。检索系统根据待检索的 EDCOM 数组从实例模型数组 EDCOM 库中进行检索。根据待检索的 EDCOM 数组按照相似度原则进行匹配，在检索中系统根据实例模型的层次结构，按照设计人员的设计需求来分层次进行匹配，在检索过程中一般按照下列方法进行检索。

设计人员首先向设计系统提供检索的模型名称，系统根据检索模型名称在数据库中查找到实例模型后反馈给设计人员实例模型的第一层次所涉及到的 EDCOM 数组信息界面，设计人员根据提供的信息界面选择或者填写信息提交给检索系统，系统根据设计人员提供的有向边 EDCOM 数组信息及各信息的权重计算实例模型的第一层相似度值  $\mu = m(11) \times I_1(C1, \text{Cobject}) + m(12) \times I_2(C1, \text{Cobject}) + \dots + m(1n) \times I_n(C1, \text{Cobject})$ ，如果  $\mu$  大于设定值时则接受 C1 为候选项，为了提高检索的精度，缩小检索实例模型的范围，在设计人员需求下系统反馈给设计人员实例模型的第二层次有向边 EDCOM 数组的信息界面，系统在收到设计人员反馈的信息后再次根据设计人员提供的信息进行相似度计算，当其相似度值大于设定值时则接受该模型为候选项。如果要继续减少模型的匹配数量，设计人员可以继续要求检索系统反馈实例模型的下一层次有向边的 EDCOM 数组信息，然后系统再次根据设计人员提交的信息进行匹配。这样系统根据模型的层次结构，

按照有向边 EDCOM 数组信息进行匹配,直到设计人员满意检索实例结果为止。

#### 4 产品实例本体模型库的管理

在产品实例模型库中各个概念实体按照概念关联关系相互关联,对模型中的任意一个概念实体的变更都可能引起其他概念实体失去关联的途径,从而导致整个产品实例模型的崩溃<sup>[9-11]</sup>。为此在产品实例模型的管理过程中,必须管理好产品模型的概念实体的复杂关联关系,以保证整个产品实例模型的概念网络的一致性和连贯性<sup>[12]</sup>。

对于新添加的概念实体,它只会在产品实例模型中添加新的关联,而不会对原有的产品实例模型中的概念关联关系造成影响。对于设计实例库中的实例本体模型进行合并和集成,提出了下面的集成算法。

设  $PDCM_i$  为第  $i$  个要集成的产品设计实例本体模型,  $PDCM_{integrate}$  为集成后的产品设计实例本体模型,  $n$  为需要添加的设计实例本体模型的数目,则设计实例本体模型的集成算法可以描述如下

```

i=1
while ( i ≤ n )
do {
lm=locate(PDCMintegrate, PDCMi)
if(lm)
{compare(PDCMintegrate, PDCMi)
if(similar(PDCMintegrate, PDCMi)or
compatible(PDCMintegrate, PDCMi)
then {add(PDCMintegrate, PDCMi)
delete(PDCMi)
else {if(reliable(PDCMintegrate, PDCMi))
update(PDCMintegrate, PDCMi)
}
}
i ++
}

```

该本体模型集成算法每次进行两个比较,即一次输入两个本体模型,得到集成后的本体模型,再把该本体模型作为一个本体模型源与新输入的本体模型进行比较,从而进行添加或者删除、更新操作。在处理删除操作时,首要考虑的问题是:一个概念实体被删除后,其他与之有关联的对象就必须修改关联属性,以保证它们仍旧属于概念网络而不被孤立出去。在删除概念实体后,对产品实例模型的中

的每个概念实体依次进行处理,若该概念与被删除概念实体有关联,则修改关联关系及关联的值。

#### 5 系统开发实例

依托相关项目,利用本体技术以汽车电涡流缓速器为对象建立了基于实例推理的产品设计系统,并在某汽车零部件厂进行了试用。整个系统采用 Client/Server 模式,利用 SQL Server2000 建立了产品设计实例信息库,以 .net 作为 SolidWorks 的二次开发工具,在基于本体模型推理的驱动下,开发了具有可重构性、开放性的汽车电涡流缓速器设计系统。图 5 是利用第二层次的检索输入的工作压力、输入电压、汽车载重、最高车速以及气隙等相关参数检索的电涡流缓速器实例模型。在本体模型库中按照设计要求检索的电涡流缓速器实例,通过实例模型可以了解设计实例产品的相关参数信息,这样设计人员可以通过这些参数信息来确定是否利用该实例进行产品设计或者查找新的实例。



图 5 电涡流缓速器检索实例

#### 6 结论

在处理工程设计问题时,过去的设计经验和设计实例都被大量参考和重利用,CBR 技术是解决那些缺乏数学模型描述的设计问题的有效方法。本文在研究了现有的基于实例推理的产品设计系统后,针对其缺少描述功能、行为等缺点提出了面向实例推理的产品设计的本体建模,通过本体建立了产品设计本体及产品设计实例本体模型,给出了产品设计实例本体模型的检索机制及本体模型库的集成算法。利用本体技术开发了基于推理的产品设计系统,这个系统已经在某汽车零部件企业进行了试用并得到了较好评价。采用本体技术开发的基于实例推理的产品设计系统能够更好地辅助设计人员进行产品

设计,从而快速地响应客户需求,在市场竞争中获取更大利益。

### 参 考 文 献

- [1] 徐雷,殷国富,宁芊,等.基于功能实例推理的敏夹具设计[J].计算机集成制造系统—CIMS,2005,11(4):458-462.
- [2] 于芳芳,黄翔,文和.实例推理在冲模设计中的应用[J].机械制造与研究,2005,34(1):11-17.
- [3] 刘轶茜,杨家明.基于实例推理的智能服装图形设计系统[J].中国图像图形学报,2005,8(A):736-739.
- [4] 高鹏,林兰芬,蔡铭,等.基于本体映射的产品配置模型自动获取[J].计算机集成制造系统—CIMS,2005,9(9):810-816.
- [5] 张东明,廖文和,胡建,等.基于本体的设计知识建模[J].华南理工大学学报(自然科学版),2005,33(5):26-31.
- [6] 马应龙,金蓓弘,冯玉琳.基于进化分布式本体的语义Web服务动态发现[J].计算机学报,2005,28(4):603-614.
- [7] 王凤英,应保胜.基于实例推理的产品概念设计系统[J].制造业自动化,2004,26(9):13-15.
- [8] 汪锦岭,金蓓弘,李京,等.基于本体的发布/订阅系统的数据模型和匹配算法[J].软件学报,2005,16(9):65-77.
- [9] 吴健,陈刚,尹建伟,等.基于本体的产品配置知识共享[J].浙江大学学报(工学版),2004,38(4):478-483.
- [10] 郝永平,王崇海,宁汝新,等.基于本体论的产品全过程知识共享研究[J].机械工程学报,2002,38(12):126-130.
- [11] YOSHINOBU KITAMURA, TOSHINOBU KASAI, RII-CHIRO MIZOGUCHI. Ontology-based description of functional design knowledge and its use in a functional way server[C]//Proc. of the Pacific Asian Conference on Intelligent Systems, 2001: 200-210.
- [12] ANDREW F, WENNY R, DAVID T. A distributed ontology framework in the semantic grid environment[C]//

Proceedings of the 19th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA'05), 2005: 366-372.

## RESEARCH AND APPLICATION OF ONTOLOGY MODELING FOR PRODUCT DESIGN BASED ON CASE REASONING

WANG Shengfa GU Xinjian  
GUO Jianfeng MA Jun  
(Institute of Manufacturing Engineering,  
Zhejiang University, Hangzhou 310027)

**Abstract:** The existing product design system based on case reasoning is analyzed. Aiming at the shortages of the design system that couldn't depict the function and deed of product design case well, a product design ontology model based on case reasoning is proposed. Product design case ontology and model are established in terms of ontology technologies. According to the characteristics of product design based on case reasoning, the important attributes of ontology model are studied. The searching method of product design case provided after product design based on case reasoning is analyzed. In the method the appropriate product design case is searched through EDCOM array and similar degree. In the process of maintenance of ontology warehouse the method on the integration of ontology is given. Finally a product design prototype system based on case reasoning and ontology technology is developed for auto parts enterprise. Through designing requirement, case searching and other functional models, this system realizes product design based on case reasoning.

**Key words:** Case-based reasoning Ontology  
Case searching Similar degree

**作者简介:** 王生发,男,1975年出生,博士研究生。主要研究方向为知识工程、产品创新设计。

E-mail: wshfa@21cn.com