

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.06.002

# 面向概念设计的三维模型多条件组合检索研究<sup>\*</sup>

付高财, 盛步云<sup>\*</sup>, 余绅达

(武汉理工大学 机电工程学院, 湖北 武汉 430070)

**摘要:**针对单一检索条件难以满足产品概念设计阶段对三维模型模糊检索的问题,对铁路电气化行业中机电产品三维模型信息表达进行了分析,构建了基于功能形式化建模的零件库资源本体,在考虑语义距离、语义重合度、层次深度3个因素的基础上,对本体的语义相似度计算原理进行了研究,同时对产品类别、功能或特性进行了相似度计算,实现了以类别\_功能\_特性为检索条件的组合式扩展查询方案,提出了一种基于本体的三维模型多条件组合检索方法;最后介绍了三维模型检索系统的设计框架及实现,并以检索电子元器件中常用模型—某型号接触器为例进行了系统的实例验证。研究结果表明:利用本体的语义关系,该系统可以有效地支持三维模型的语义扩展检索,有助于模型的设计重用。

**关键词:**概念设计;本体;多条件组合;三维模型检索

**中图分类号:**TH166;TH122;TP391

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-4551(2016)06-0648-07

## 3D model multi-condition combined retrieval for conceptual design

FU Gao-cai, SHENG Bu-yun, YU Shen-da

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that a single retrieval condition was very difficult to meet the fuzzy retrieval of 3D model at the conceptual design stage, the information representation of three-dimensional model of electromechanical products in the railway-electrical industry was analyzed. And the resources ontology of parts library based on modeling of formal function was built. Based on the consideration of the semantic distance, semantic coincidence degree, and the depth level, the calculation principle of semantic similarity in ontology was studied. Meanwhile, the similarity of product category, function or characteristic was calculated, a combined and extended query program with the retrieval conditions of product category, function, or attributes was implemented. And a three-dimensional model multi-condition combined retrieval method based on ontology was proposed. Finally, the design framework and implementation of the three-dimensional model retrieval system was introduced. An example of retrieving a model of electrical product—a type of contact was presented to illustrate that program. The results indicate that program can effectively support the three-dimensional model retrieval of semantic extension by semantic relations of ontology, which can help design reuse of the model.

**Key words:** conceptual design; ontology; multi-condition combined; 3D model retrieval

## 0 引言

面向设计的三维模型检索技术作为新产品研发设计的必要手段,能够有效重用零件库中的设计资源。研究表明,在新产品研发中,约40%是重用已有的零

部件设计,约40%可在修改现有设计的基础上获得,仅约20%来自全新设计<sup>[1]</sup>。Ullman<sup>[2]</sup>认为,超过75%的设计活动都是对以往设计知识的检索与复用。因此,深入研究三维模型的检索方法,可提高产品设计效率。

收稿日期:2016-01-28

基金项目:湖北省自然科学基金资助项目(2015CFA115);湖北省科技支撑计划项目(2015BAA058)

作者简介:付高财(1989-),男,湖北广水人,硕士研究生,主要从事计算机辅助工艺设计方面的研究。E-mail:whutjdfgc@163.com

通信联系人:盛步云,男,教授,博士生导师。E-mail:shengby@whut.edu.cn

目前,三维模型的检索方法主要分为基于文本关键字、内容和语义的模型检索<sup>[3]</sup>。基于文本的模型检索主要是根据文件名、物料代码等文本来检索。但由于文字标签是人为制定的,没有统一的描述标准,受主观因素影响大,检索能力有限。基于内容的模型检索主要通过函数投影、统计抽象分析方法提取模型的几何形状特征、拓扑结构等,形成特征描述子并比较其相似性<sup>[4]</sup>,但由于低层几何特征与高层语义之间存在“语义鸿沟”问题,使得所开发的系统实用性较差。基于语义的模型检索是以应用领域为基础,充分考虑设计特征或产品功能、工艺、属性特征等信息的语义相似性。清华大学的王占松等<sup>[5]</sup>通过构建三维 CAD 模型的功能语义本体,实现了模型间的功能相似性评价。清华大学马嵩华<sup>[6]</sup>建立了基于领域本体的开放式零件库系统,提供零件自助发布、语义信息检索、跨设备跨平台的零件数据浏览等功能;Tsai 等<sup>[7]</sup>将加工要求、质量、材料等工程语义信息数字化,提出基于模糊集的三维 CAD 模型相似性评价。Ramesh 等<sup>[8]</sup>使用单元凸起分解法将 CAD 零件以特征存在性、特征数量、特征尺寸等 7 个元素形成表征值以比较 CAD 模型的相似度。然而这些研究无法全面集成并理解领域模型的功能、属性、产品性能等高层语义信息,且对模型的信息描述没有标准化规定,导致检索系统的通用性不高。

因此,本研究提出一种面向概念设计阶段的三维模型检索方法。

1 产品三维模型的信息表达

在铁路电气化行业中,描述机电产品信息的知识主要来源于由供应商提供的产品信息描述文档,且产品分类众多、信息复杂,导致对产品名称、功能、特性的描述规则都缺乏统一的标准。

针对概念设计阶段对模型检索的需求以及铁路电气化行业的产品特性,本研究将产品信息按类分为基本信息、功能信息、性能信息、工艺信息、状态信息等,具体表达结构如图 1 所示。

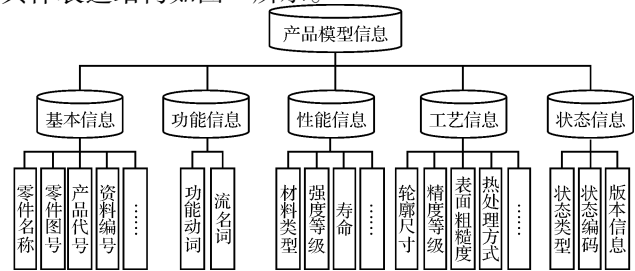


图 1 产品三维模型的信息表达结构

基本信息包括零件名称、零件图号、产品代码和资料编号等;功能信息主要描述该产品在特定环境下所具有的用途描述;性能信息包括材料类型、强度等级、功率因素、寿命等;工艺信息包括轮廓尺寸、精度、粗糙度、表面处理方式等,状态信息即对模型当前状态的描述,包括状态类型、状态编码、版本信息等。

2 基于本体的零件库资源描述

在知识工程领域中,本体是共享概念模型的明确的、形式化规范说明<sup>[9]</sup>。在本体描述的支持下,可以有效解决知识表达中“同形多义”和“同义多形”造成的结果失配问题。

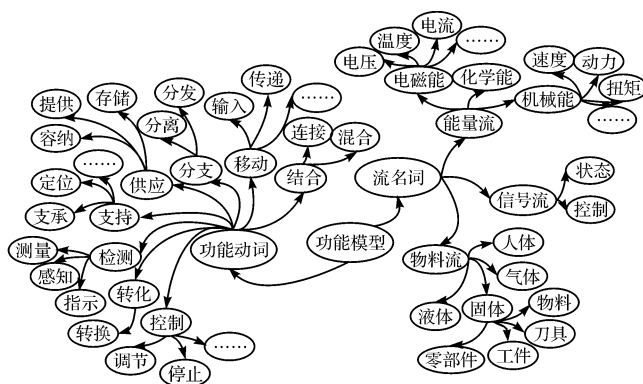
定义零件库资源本体模型  $O = \langle CS, FS, AS \rangle$ ,其中:CS—产品资源概念的集合,FS—概念的属性集合,RS—各概念间关系的集合。

概念集  $CS = \{C_i, 1 \leq i \leq n\}$ ,其中: $C_i$ —产品资源所有概念元素, $n$ —概念总数。根据 GB/T 17645. 42《构造零件族的方法学》标准,笔者采用自顶向下的方法概括零件库资源的树形结构。概念集以能够反映机电领域知识的基础词汇表述,形成零件库专用概念词典。如:机械标准件→(紧固件、轴承、齿轮、弹簧、……);电气零部件→(电子元器件、电器电料、仪器仪表、……)。

属性集  $FS = \langle Funs, Attr \rangle$ ,Funs 和 Attr 分别表示零件的功能和特性属性集合,分别以本体概念的对象和数据类型属性表征。

功能描述 Funs 是对概念集合 CS 的功能特征进行规范化建模。笔者将机电产品所描述的知识在功能原理层进行抽象,并定义零件的功能描述为“功能动词—流名词”,记为  $\langle F_{Verb}—F_{Noun} \rangle$ 。针对机电产品在概念设计过程中的可变功能需求<sup>[10]</sup>,本研究将功能要素库的功能分类术语进行适当改进修饰作为对象类型属性,对产品的功能进行形式化建模<sup>[11]</sup>,如图 2 所示。

特性描述 Attr,表示零件的某些关键特性,且描述形式为“特性名称—特性值—特性值类型”,记为  $\langle A_{Name}—A_{Value}—A_{Type} \rangle$ 。笔者根据不同类别定义不同概念的属性特征,如紧固件可定义强度等级、材质、表面处理方式等特性,电子元器件可定义最大功率、标称电压、稳压精度、封装方式等特性。



(a) 功能-流分类图



### (b) 部分产品功能建模

图2 产品功能形式化表达

关系集 RS,表示领域本体中各种概念之间的相互作用,主要描述概念和概念、属性和属性、概念和属性之间的相互映射关系。为方便本体表达,笔者仅定义概念间父子类关系、对象属性关系等 5 种关系,具体关系及其性质如表 1 所示。

表 1 关系集 RS 定义

| RS 描述  | 关系表达式         | 说明                       | 性质  |
|--------|---------------|--------------------------|-----|
| 继承关系   | subclass-of   | 概念间为父子类关系                | 传递性 |
| 组成关系   | part-of       | 概念间为部分<br>与整体关系          | 传递性 |
| 等价关系   | equivalent-to | 概念间为等价关系                 | 传递性 |
| 互斥关系   | disjoint-with | 概念间没有交集                  | 传递性 |
| 对象属性关系 | attribute-of  | 概念 A 是概念 B<br>的属性(如功能描述) | 函数性 |

根据领域本体模型的定义,本研究采用本体构建工具 protégé 4.1,选择 owl 来构建机电产品的三维模型领域本体,最终实现零件库资源本体的主要概念关系如图 3 所示。

### 3 基于类别\_功能\_特性的匹配方案

### 3.1 基于本体的相似度计算原理

零件库资源本体图中节点表示本体概念,节点间的有向边表示概念间的关系,图中两个节点  $M_1$ 、 $M_2$  的语义相似度记为  $Sim(M_1, M_2)$ 。基于本体的相似度计算主要考虑语义距离、语义重合度、节点深度 3 个影响因素,且不考虑本体中概念词连通路径上各个边的类型差异。

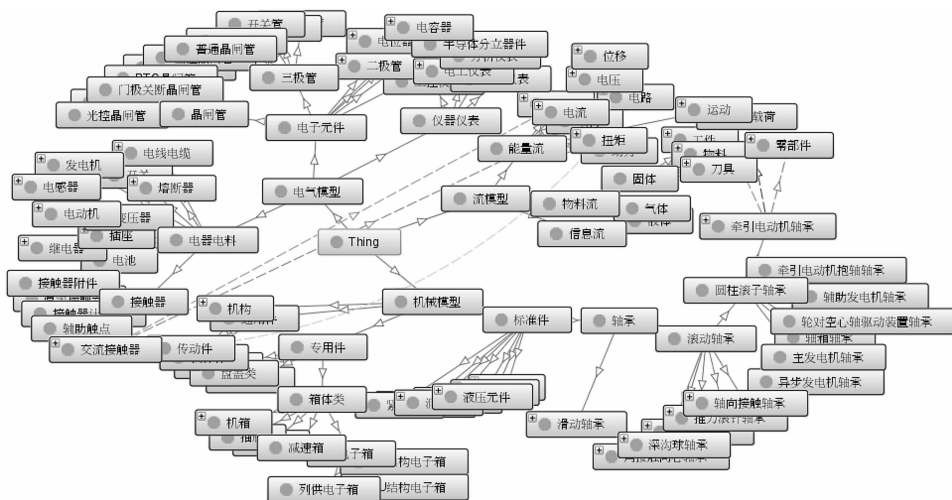


图3 零件库主要概念关系

语义距离指本体树中连接两个概念的最短路径的长度,记作  $Dist(M_1, M_2)$ 。两个概念  $M_1, M_2$  之间的语义

距离方面的相似度以  $Sim_{\text{dist}}(M_1, M_2) = \varepsilon / (\text{Dist}(M_1, M_2) + \varepsilon)$  表示(其中: $\varepsilon$ —可调节距离参数,  $\varepsilon > 0$  取  $\varepsilon = 2.2$ )。

语义重合度是指两个概念之间在其共同祖先节点上的相同程度。以  $Sim_{\text{dop}}(M_1, M_2) = \sqrt{(2Dep(Lca) - 1) / (Dep(M_1) + Dep(M_2) + 1)}$  表示两个概念  $M_1$ 、 $M_2$  之间的语义重合度<sup>[12]</sup> (其中:  $Lca$ —节点  $M_1$  和  $M_2$  在本体结构中最近共同祖先节点,  $Dep(M)$ —节点  $M$  在树中的深度)。

节点深度指概念在本体树中的层次深度<sup>[13]</sup>。以  $Sim_{\text{dep}}(M_1, M_2) = \{[(Dep(M_1) + Dep(M_2)) / (|Dep(M_1) - Dep(M_2)| + 2Dep(Tree)) + Dep(Lca) / Dep(Tree)]\} / 2$  表示两个概念  $M_1$ 、 $M_2$  的概念深度 (其中:  $Dep(M)$ —概念节点  $M$  的深度,  $Dep(Tree)$ —本体树的深度)。

在考虑上述因素的基础上,本研究提出领域本体中语义相似度计算原理:

$$Sim_{\text{Concept}}(M_1, M_2) = \begin{cases} pSim_{\text{dist}} + qSim_{\text{dop}} + wSim_{\text{dep}} \\ p + q + w = 1 \\ p \geq q \geq w \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $p, q, w$ —权重调节因子,依据文献[13]中的权值分配情况,  $p, q, w$  的取值分别为 0.5, 0.4, 0.1。

3.2 单一检索条件分析

3.2.1 类别相似度

以产品类别为检索条件的模型扩展查询时,为了便于快速定位搜索目标的范围,提高定位效率,本研究以式(1)计算类别相似度  $Sim_{\text{Sort}}(M_1, M_2)$ 。

3.2.2 基于功能本体的相似度

产品模型往往具有不同的功能描述,因此,在设计阶段,检索系统需要支持以多功能描述为检索条件的扩展查询。三维模型  $M_1$ 、 $M_2$  的功能描述分别以集合  $M_{1\text{Func}} = \{x_i = \langle V_i - N_i \rangle, 1 \leq i \leq m\}$ 、 $M_{2\text{Func}} = \{y_j = \langle V_j - N_j \rangle, 1 \leq j \leq n\}$  表示 (其中:  $V, N$ —功能动词和流名词)。则元素  $x_i$  与  $y_j$  的相似度为功能动词  $V$  和流名词  $N$  的语义相似度乘积:

$$Sim(M_1(x_i), M_2(y_j)) = Sim_{\text{Concept}}(M_1(x_{i,V}), M_2(y_{j,V})) \times Sim_{\text{Concept}}(M_1(x_{i,N}), M_2(y_{j,N})) \quad (2)$$

本研究将  $M_{1\text{Func}}$  中的元素  $x_i$  依次与  $M_{2\text{Func}}$  中的元素  $y_j$  配对,根据式(2)计算每对元素的相似度  $Sim(M_1(x_i), M_2(y_j))$  记为  $\delta_{ij}$ ,并以  $\delta_{ij}$  作为矩阵元素,形成两个模型之间功能描述的相似性矩阵  $M = (\delta_{ij})_{m \times n}$ 。根据矩阵  $M$  计算概念  $M_1$ 、 $M_2$  的功能相似度,具体算法如下:

Input: 相似性矩阵  $M = (\delta_{ij})_{m \times n}$   
Output:  $M_1$ 、 $M_2$  的功能相似度  $Sim_{\text{Func}}(M_1, M_2)$   
1 int  $k = 0$   
2 for each  $\delta_{ij}$  in  $M$   
3 if  $\delta_{ij} = 1$   
4 then  $k + +$   
5 delete 矩阵  $M$  的第  $i$  行第  $j$  列元素,形成新矩阵  $M'$   
6 end if  
7 end for  
8 计算矩阵  $M'$  ( $M'$  为  $m'$  行、 $n'$  列矩阵) 每行的值之和  $\xi_i (1 \leq i \leq m')$

$$9 \text{ return } Sim_{\text{Func}}(M_1, M_2) = \frac{k + \frac{\sum_{i=1}^{m'} \xi_i}{\max(m', n')}}{\max(m, n)}$$

3.2.3 改进的多维特性相似度

本研究在  $Tversky$ <sup>[14]</sup> 理论的基础上,提出一种改进的基于多维度特性的语义相似度计算方法。

产品三维模型  $M_1$ 、 $M_2$  的特性描述以集合  $M_{1\text{Attr}} = \{x_i = \langle N_i - V_i \rangle, 1 \leq i \leq m\}$ 、 $M_{2\text{Attr}} = \{y_j = \langle N_j - V_j \rangle, 1 \leq j \leq n\}$  表示 (其中:  $N, V$ —特性名称和特性值)。集合  $M_{1\text{Attr}}$ 、 $M_{2\text{Attr}}$  中完全相同的元素个数为  $k$ ,一一映射的特性值分别为:  $Value(M_1) = \{V_{1,M_1}, \dots, V_{t,M_1}, \dots, V_{k,M_1}\}$ 、 $Value(M_2) = \{V_{1,M_2}, \dots, V_{t,M_2}, \dots, V_{k,M_2}\}$  (其中:  $V_1 \sim V_t$ —数值类特性值,  $V_{t+1} \sim V_k$ —文本类特性值)。根据特性值的类型不同,采用不同的相似度计算方法,特性相似度  $Sim_{\text{Attr}}(M_1, M_2)$  的具体计算步骤如表 2 所示。

表 2 特性相似度计算步骤

| 步骤                       | 简要内容                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 输入模型 $M_1$ 、 $M_2$ 的特性描述 | $M_{1\text{Attr}} = \{x_i = \langle N_i - V_i \rangle, 1 \leq i \leq m\}$ 、 $M_{2\text{Attr}} = \{y_j = \langle N_j - V_j \rangle, 1 \leq j \leq n\}$<br>$m, n$ — $M_1$ 、 $M_2$ 的特性个数                                                                                                                                     |
| 特性名称相似度计算                | $Sim_{\text{Type}}(M_1, M_2) = \frac{f(M_1 \cap M_2)}{f(M_1 \cap M_2) + \theta f(M_1 - M_2) + (1 - \theta)f(M_2 - M_1)}$<br>$f(M_1 \cap M_2)$ —概念 $M_1$ 、 $M_2$ 之间特性名称相同的个数; $f(M_1 - M_2)$ — $M_1$ 中有但 $M_2$ 中没有的特性个数; $f(M_2 - M_1)$ — $M_2$ 中有但 $M_1$ 中没有的特性个数; $\theta$ —对称性调节因子,取 $\theta = 0.5$ ,即不考虑由对称性所引起的相似度不同。 |

续表

| 步骤                       |        | 简要内容                                                                                                                                                                                      |
|--------------------------|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 提取 $M_1$ 、 $M_2$ 的公共特性元素 |        | $Value(M_1) = \{V_{1,M_1}, \dots, V_{t,M_1}, \dots, V_{k,M_1}\}$ 、 $Value(M_2) = \{V_{1,M_2}, \dots, V_{t,M_2}, \dots, V_{k,M_2}\}$<br>$V_1 \sim V_t$ —数值类特性值, $V_{t+1} \sim V_k$ —文本类特性值 |
| 数值类特性值                   |        | $Sim_{Number}(M_1, M_2) = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t \left( 1 - \frac{ V_{i,M_1} - V_{i,M_2} }{\max(V_{i,M_1}, V_{i,M_2})} \right)$                                                         |
| 特性值<br>相似度计算             | 文本类特性值 | $Sim_{String}(M_1, M_2) = \frac{\sum_{i=t+1}^k Sim_{Concept}(V_{i,M_1}, V_{i,M_2})}{k - t}$                                                                                               |
|                          | 加权之和   | $Sim_{Value}(M_1, M_2) = \frac{t}{k} \times Sim_{Number}(M_1, M_2) + \left( \frac{k-t}{k} \right) \times Sim_{String}(M_1, M_2)$                                                          |
| 特性相似度计算                  |        | $Sim_{Attr}(M_1, M_2) = \lambda Sim_{Type}(M_1, M_2) + (1 - \lambda) Sim_{Value}(M_1, M_2)$<br>$\lambda$ —调节因子, 表示特性名称相似性所占的权重, 取 $\lambda = 0.6$                                         |

3.3 多条件组合检索方案

多条件组合检索方案主要是通过功能或多维特性扩展查询使信息搜索不受关键词提取的主观性限制, 从而在功能、特性维度上扩展查询零件信息的范围。

设计人员根据概念设计的需求分析结果, 选择输

入目标模型的类别、功能、特性描述中的任意项, 多种检索条件组合使用, 如: “类别→特性”、“功能→类别”、“功能→类别→特性”等组合形式, 其中, 类别与功能的检索可实现模型的模糊查询, 特性的检索可实现模型的精确查询, 能够全面有效表达设计人员的检索意图。具体实现流程如图 4 所示。

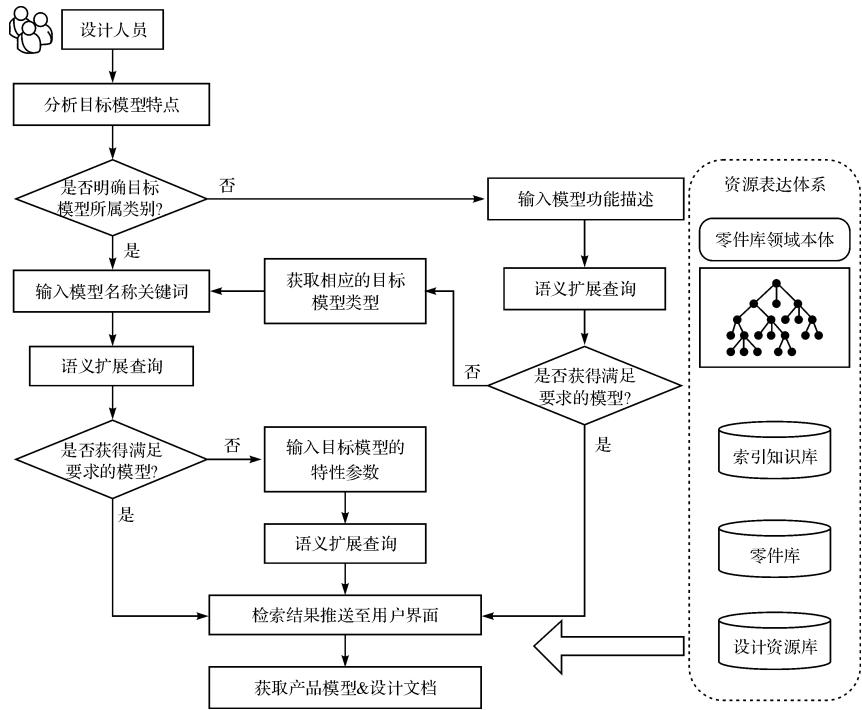


图 4 多条件组合检索方案流程图

系统根据匹配算法, 分别计算以产品类别、功能、特性为检索条件的相似度 (其中未输入项的相似度记为 0), 并加权计算返回概念间的语义相似度:

$$Sim(M_1, M_2) = \begin{cases} \alpha Sim_{Sort}(M_1, M_2) + \beta Sim_{Func}(M_1, M_2) \\ \quad + \gamma Sim_{Attr}(M_1, M_2) \\ \alpha + \beta + \gamma = 1 \\ \alpha \geq \beta \geq \gamma \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\alpha, \beta, \gamma$ —权重调节因子, 分别表示类别、功能、特

性描述对语义相似性的影响程度, 根据概念设计阶段的检索需求,  $\alpha, \beta, \gamma$  的取值为 0.4、0.3、0.3。

4 检索系统的设计与实现

4.1 系统的体系结构

本研究采用基于 TCP 传输协议的客户端/服务器模式体系, 设计检索系统体系框架, 以 Microsoft Visual

Studio 2010 为集成开发环境,以 SQL Server 2008 作为后端数据库来存储三维模型的元数据信息,开发了以产品名称、功能或特性的语义描述为检索条件的三维模型检索系统,该系统体系结构主要分为知识资源层、应用服务层和用户接口层,体系结构图如图 5 所示。

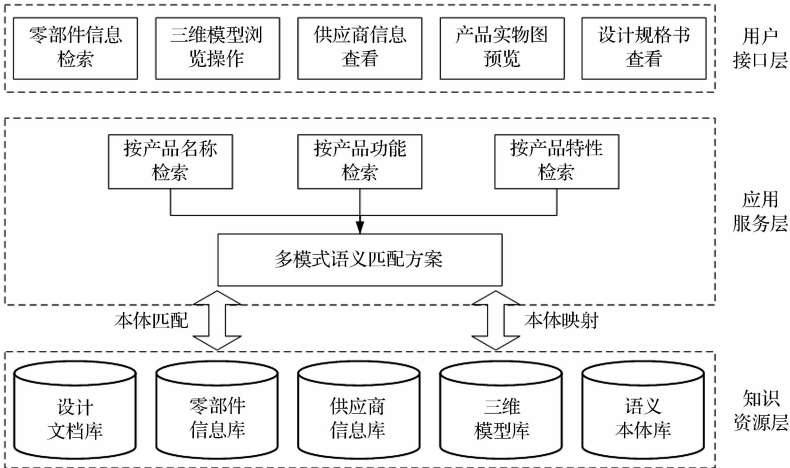


图 5 三维模型检索系统的体系结构图

- (1)用户界面层。为用户提供信息搜索查询、3D 模型浏览、搜索结果展示等。
- (2)应用服务层。负责完成三维模型检索的整个过程。通过输入产品名称、功能或特性信息,对模型进行相似度匹配。
- (3)知识资源层。负责管理并存储零件库中的资源数据,包括零部件模型库、语义本体库、设计文档库等。

4.2 实例结果与分析

本研究以检索铁路电气化行业中的接触器为例对

该检索系统进行实例验证。在检索系统的提示选择框中,设计人员根据设计需求分析以及对目标模型信息的了解程度,选择输入目标模型  $M_1$  关于类别、功能或特性的任意项描述。某目标模型的检索条件描述以及与零件库中某模型  $M_2$  的计算样例如表 3 所示。

系统在进行模型检索时,将依据用户输入的检索条件选择对应的检索模式进行检索,并依据多模式检索方案对上述模型特征进行概念语义相似度计算,以特定模式“类别→特性”进行检索上述目标模型  $M_1$ , 其检索结果如图 6 所示。

表 3 目标模型  $M_1$  与待检索模型  $M_2$  计算样例

|      | 目标模型 $M_1$     | 待检索模型 $M_2$     | 相似度计算         |             |
|------|----------------|-----------------|---------------|-------------|
| 类别描述 | 接触器            | 交流接触器           | 类别相似度 0.669 3 | /           |
| 功能描述 | 保护—电压<br>接通—电路 | 保护—电压           | 功能相似度 0.666 7 | /           |
|      |                | 接通—电路           |               |             |
|      |                | 分断—电路           |               |             |
| 特性描述 | 制造商:施耐德        | 制造商:西门子         | 特性相似度 0.870 2 | 加权值 0.728 8 |
|      | 动作方式:直动式       | 动作方式:直动式        |               |             |
|      | 极数:3           | 极数:3            |               |             |
|      | 线圈电压/V:48      | 线圈电压/V:48       |               |             |
|      | 额定电压/V:380     | 辅助触点类:1NC + 1NO |               |             |
|      | 额定电流/A:12      | 额定电压/V:380      |               |             |
|      |                | 额定电流/A:9        |               |             |

目标模型  $M_1$  的检索条件输入如图 6 中 a 块所示,即产品名称\_功能\_特性的文本描述;扩展查询时检索结果显示列表如图 6 中 b 块所示,主要显示具有相似度产品的物料代码、名称、型号、制造商等;图 6 中的 c 块允许设计人员对产品的三维模型进行旋转预览、下载到本地或实物图片的查看等操作;图 6 中的 d 块可

输入精确查询条件,如物料代码或产品特性参数,在物料列表中进一步筛选,一般用于完全匹配的精确查询操作。

结果表明:与基于内容和关键字的检索方法相比,多条件组合匹配方法在功能、属性语义查询上进行了扩展,能得到更多符合检索意图的结果。



图 6 “类别→特性”的检索结果图

## 5 结束语

本研究分析了铁路电气化行业中机电产品的特征,构建了零件库领域本体,提出了以产品名称、功能或特性为检索条件的组合式语义匹配方案,通过加权计算了模型间的语义相似度;介绍了三维模型检索系统的设计框架及实现,并以检索接触器为例进行了系统应用。

实例结果表明,通过利用本体的语义关系,能够扩展查询设计人员的检索需求,同时以多种条件相互组合查询,能够提高查询的有效性。下一步的研究工作是:在工艺设计阶段,如何比较模型间的工艺相似性,以实现零件工艺信息的重用。

## 参考文献 (References):

- [1] LYER N, JAYANTI S, LOU K, et al. Three-dimensional shape searching: state-of-the-art review and future trends [J]. *Computer-Aided Design*, 2005, 37(5): 509-530.
- [2] ULLMAN D G. The mechanical design process [M]. New York: McGraw-Hill, 1997.
- [3] 张开兴, 张树生, 刘贤喜. 三维 CAD 模型检索技术研究现状与发展分析 [J]. *农业机械学报*, 2013, 44(7): 256-263.
- [4] 李成刚. 基于内容的三维模型搜索引擎技术与系统开发 [D]. 北京: 清华大学机械工程学院, 2011.

- [5] 王占松, 田 凌. 基于功能的三维模型检索系统 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2013, 25(12): 1877-1885.
- [6] 马嵩华, 田 凌. 领域本体组织的自助式零件库 [J]. *计算机集成制造系统*, 2014, 20(2): 250-258.
- [7] TSAI C Y, CHANG C A. A two-stage fuzzy approach to feature-based design retrieval [J]. *Computers in Industry*, 2005, 56(5): 493-505.
- [8] RAMESH M, YIP-HOI D, DUTTA D. Feature based shape similarity measurement for retrieval of mechanical parts [J]. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2001, 1(3): 245-256.
- [9] 邓志鸿, 唐世渭, 张 铭, 等. Ontology 研究综述 [J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2002, 38(5): 730-738.
- [10] 赵 琳, 贺海波, 邓益民. 可变功能机械系统概念设计的相似模型构建研究 [J]. *机电工程*, 2014, 31(12): 1530-1534.
- [11] 郭 钢, 汤华茂, 罗 好. 基于语义的产品功能形式化建模 [J]. *计算机集成制造系统*, 2011, 17(6): 1171-1177.
- [12] 贺元香, 史宝明, 张 永. 基于本体的语义相似度算法研究 [J]. *计算机应用与软件*, 2013, 30(11): 312-315.
- [13] 张沪寅, 温春艳, 刘道波, 等. 改进的基于本体的语义相似度计算 [J]. *计算机工程与设计*, 2015, 36(8): 2206-2210.
- [14] 黄宏斌, 董发花, 邓 苏, 等. 一种跨本体的语义相似度计算方法 [J]. *计算机科学*, 2008, 35(7): 153-156.

[编辑: 李 辉]

## 本文引用格式:

付高财, 盛步云, 余绅达. 面向概念设计的三维模型多条件组合检索研究 [J]. *机电工程*, 2016, 33(6): 648-654.

FU Gao-cai, SHENG Bu-yun, YU Shen-da. 3D model multi-condition combined retrieval for conceptual design [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016, 33(6): 648-654.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>