doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.052

# 面向设计重用的三维 CAD 模型局部结构检索方法

张开兴[1]　杭晟煜[1]　赵秀艳[1]　王金星[1]　宋正河[2]　刘贤喜[1,3]

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083;
3. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018)

**摘要**: 为了更好地实现面向设计领域的三维 CAD 模型设计信息的有效重用,提出了一种融合语义的三维 CAD 模型局部结构检索方法。首先以设计特征作为设计语义信息的基础载体,对三维 CAD 模型进行结构化表征,并用特征属性邻接图来表示;然后设计能够捕捉不同层次信息的特征描述子,构建融合语义的特征相似性评价模型;最后采用子图同构算法计算查询局部结构与模型库中零件的特征属性邻接图的特征匹配对,以此计算相匹配局部结构的相似度。实验结果表明,该方法能够较好地实现融合语义的三维 CAD 模型局部结构检索,可以有效地支持面向农机设计领域的三维 CAD 模型设计信息的重用。基于检索的设计重用方法可为农机装备数字化设计中各类成果的有效重用提供多粒度、精确化和智能化的方法。

**关键词**: 三维 CAD 模型; 局部结构检索; 设计重用; 设计语义; 特征属性邻接图; 子图同构

**中图分类号**: TP391　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2017)07-0405-08

# Effective Subpart Retrieval Method of 3D CAD Models for Design Reuse

ZHANG Kaixing[1]　HANG Shengyu[1]　ZHAO Xiuyan[1]　WANG Jinxing[1]　SONG Zhenghe[2]　LIU Xianxi[1,3]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Shandong Agricultural University*, *Taian* 271018, *China*
2. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
3. *Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machineries and Equipments*, *Taian* 271018, *China*)

**Abstract**: With the development of digital design and manufacturing integrated technology, 3D CAD model has become the core media of expressing product design and manufacturing information, efficiently locating the desired model from massive candidates, fully exploiting and reusing the implicit knowledge had an important role in improving the mechanical design efficiency and quality in the agricultural equipment field. To effectively realize the reuse of design information of 3D CAD models in design domain, an effective subpart retrieval method of 3D CAD models merging with design semantics was proposed. Firstly, design feature was taken as the basic carrier of design semantic information, the 3D CAD model was structuralized and represented by using a feature attribute adjacency graph (FAAG). Then, a multilevel feature descriptor capturing different levels of information for detailed part design was designed to establish the design feature similarity assessment model. Finally, the matched feature pairs were extracted by using the sub-graph isomorphism algorithm between the FAAGs of the query subpart and the part in the model library to calculate the similarity between matched subparts. Experimental results showed that the proposed method can effectively support subpart retrieval of 3D CAD models merging with design semantics for design reuse. The proposed research results can provide a novel reuse method of multi-granularity, precise and intelligent for the agricultural machinery digital design, and had an important role in improving the mechanical design efficiency and quality in the agricultural equipment field.

**Key words**: 3D CAD model; subpart retrieval; design reuse; design semantics; feature attribute adjacency graph; sub-graph isomorphism

收稿日期: 2016-10-28　修回日期: 2016-12-15

**基金项目**: 国家重点研发计划项目(2016YFD0700500)、山东省“双一流”奖补资金项目(SYL2017XTTD14)、山东省自然科学基金项目(ZR2015EL022)和山东省现代农业产业技术体系水稻创新团队项目

**作者简介**: 张开兴(1984—),男,副教授,博士,主要从事农业 CAD 和农业信息化研究,E-mail: kaixingzhang@139.com

**通信作者**: 刘贤喜(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事农业 CAD/CAM 和虚拟现实技术研究,E-mail: wjbliu@sdau.edu.cn

## 引言

日益增多的三维 CAD 模型为产品设计带来了大量的可重用资源,且设计资源的重用在产品的创新设计中正变得越来越重要。据统计,在产品设计过程中,约 40% 是重用过去的部件设计,约 40% 是对已有设计部件的微小修改,而只有约 20% 是完全新的设计[1-2]。正是由于工程领域对设计资源重用的迫切需求,基于三维模型检索的设计重用技术近年来成为研究热点之一。然而已有方法通常只考虑三维 CAD 模型的整体检索,忽略了产品数字化设计中的局部结构检索需求。事实上,在产品设计过程中,大量的设计重用是在更细观的特征级和局部结构级。即在更多情况下,能够被重用的仅仅是模型间足够相似的一些局部区域,而这些局部区域可以源于不同的三维 CAD 模型。因此,如何从海量产品模型中快速、有效地查找适合设计重用的局部结构已成为产品开发各环节的一个迫切需求[3-4]。

近年来,三维 CAD 模型检索技术研究正在向融合语义的方向发展,以更高的支持面向领域的重用,其基本思想是不仅考虑检索对象几何形状的相似性,还要考虑应用领域语义上的相似性[5]。BESPALOV 等[6]利用尺度空间技术将三维网格模型分割为若干有意义的特征面片,并基于特征面片间的关联关系构建二叉树,通过子图匹配实现局部结构检索。BIASOTTI 等[7]利用扩展 Reeb 图表征三维模型,并利用子图匹配实现局部检索。BAI 等[8]提出了基于 DBMS 图(多分辨率骨架图)及子图匹配的三维 CAD 模型局部结构检索方法。但是,这些方法主要面向三角网格模型,获得的局部结构难以捕捉与其关联的设计信息,因而无法实现已有设计资源的有效重用[9]。

陶松桥等[10]提出了一种基于面属性化邻接图非精确匹配的 CAD 模型搜索方法,通过提取 CAD 模型中的 Brep 信息将模型转化为面属性化邻接图,将非精确图匹配问题转化为二次优化问题求解,可以实现模型的局部结构检索。LI 等[11]提出基于特征依赖有向无环图(Feature dependency directed acyclic graph, FDAG)的局部结构检索方法。该方法通过移除 FDAG 中关键点的方式提取可重用区域,并利用基于 D2 形状分布图的表征、相似性评价方法计算查询实例和可重用区域之间的相似度。该方法以工程语义为基础,因此,非常适合于三维 CAD 模型。BAI 等[12]提出一种面向设计重用的三维 CAD 模型局部结构检索方法。该方法采用扩展特征树表示基于设计特征的三维 CAD 模型,然后基于启发式规则提取潜在的可重用区域并且对其进行表征,最后采用树匹配算法实现由简单查询实例查找完整可重用区域的多模式局部结构检索。但是,这些方法还停留在特征几何层面相似性评价,缺乏对特征的尺寸、精度、公差等设计语义信息的深入考虑,通常适用于产品概念设计阶段的参考重用。

本文针对产品详细设计阶段的自适应重用需求,提出融合语义的三维 CAD 模型局部结构检索方法。首先以设计特征作为设计语义信息的基础载体,将三维 CAD 模型表示为具有设计语义信息的设计特征集合,并用特征属性邻接图来表示和描述。此时,三维 CAD 模型局部结构检索问题可以转换为查询局部结构与模型库中零件的特征属性邻接图子图同构匹配问题。然后,设计能够捕捉不同层次信息的特征描述子,构建融合语义的特征相似性评价模型,以支持特征的精细化比较。最后,根据匹配特征对的相似度计算相匹配局部结构的相似度,以实现融合语义的局部结构相似性评价。

## 1 设计特征语义信息模型的定义与表示

定义 1:设计特征语义信息模型。设计特征语义信息模型由设计特征与设计语义信息构成,可表示为

〈设计特征语义信息模型〉::=([设计语义]〈设计特征〉)

〈设计语义〉::=〈特征间关联设计语义〉|〈特征内关联设计语义〉

〈设计特征〉::=[特征内关联设计语义]〈几何要素〉

其中,设计特征是设计语义信息的基础载体,设计语义分为特征间关联与特征内关联两种模式。特征间关联设计语义主要用来描述设计特征间的邻接关系,包括父子、兄弟、对称阵列、设计基准等,特征内关联设计语义主要描述设计特征的基本属性(如特征的类型、设计参数等)、设计要求(如尺寸、公差、表面粗糙度等)等。

定义 2:特征属性邻接图。特征属性邻接图是一种用于描述设计特征语义信息模型内部特征及特征间邻接关系的图结构。在特征属性邻接图中,每一个图顶点对应于模型中的一个设计特征,设计特征的基本属性和设计要求作为顶点的属性,图中顶点间的关系与设计特征间的邻接关系相对应。

首先,利用一种基于图和规则相结合的特征识别算法[13]对 CAD 模型包含的特征进行自动识别,该算法对相交特征识别具有较好的效果,识别效率较高。对于模型中少量难以自动识别的特征,则利

用人机交互来实现。本文考虑的设计特征主要是设计领域常见的凸台类（Boss）、型腔类（Pocket）、台阶类（Step）、孔类（Hole）和槽类特征（Slot），以及由这些基本特征组合、或按一定规律排布而成的复合特征。然后，利用 CAD 系统的 API 函数对三维模型进行解析（各主流 CAD 系统都提供了在三维 CAD 模型上直接标注尺寸精度、表面粗糙度等设计语义信息[14-15]），提取与几何点、边、面关联的设计语义信息，并根据设计特征组成的几何要素集，将几何关联的尺寸、公差、表面粗糙度等信息映射到对应的设计特征上，完成特征内关联设计语义信息的提取。从而实现将三维 CAD 模型表示为具有设计语义信息的设计特征集合，并用特征属性邻接图来表示和描述。图 1 给出了一产品三维 CAD 模型及其对应的特征属性邻接图，该模型由 5 个设计特征组成。

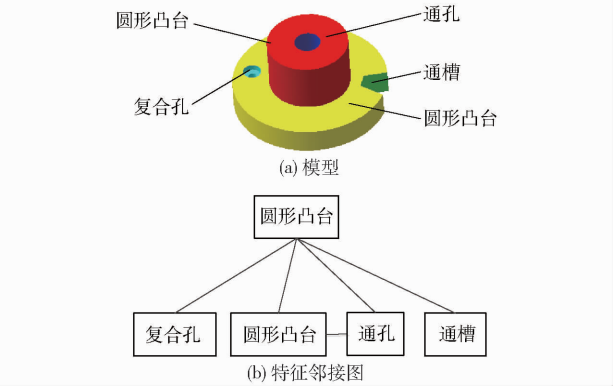



图 1　产品三维模型及其特征邻接图示例

Fig. 1　3D model of sampling product and its feature adjacency graph

## 2　基于子图同构的三维模型局部结构检索方法

### 2.1　局部结构匹配方法

为实现局部结构匹配，本文将利用子图同构算法来实现属性图中寻找特定子属性图。

定义 3：图同构。对于 2 个图 $G=(V,E)$、$G'=(V',E')$，如果存在一一映射函数 $f:v_i\rightarrow v_j'$ 且 $e=(v_i,v_j)$ 是 $G$ 中的一条边，当且仅当 $e'=(v_i',v_j')$ 是 $G'$ 的一条边，则称 $G$、$G'$ 是同构的。

定义 4：子图同构。对于 2 个图 $G=(V,E)$、$G'=(V',E')$，如果 $G'$ 有子图 $G''=(V'',E'')$，$V''\subseteq V'$，$E''\subseteq E'$，使得 $G''$ 与 $G$ 同构，则称 $G$、$G'$ 是子图同构的。

判断 2 个图是否同构，本质上就是看是否存在两图顶点之间的一个映射，使得两图的边在该映射下也保持对应。假设查询局部结构与模型库中零件的特征邻接属性图分别为 $G_1$ 与 $G_2$，采用子图同构算法可快速获得 $G_1$ 与 $G_2$ 的一个匹配 $M$，即 $G_1$ 到 $G_2$ 的一个映射。对于 $G_1$ 的每个顶点 $v_i$，在 $G_2$ 中只有 1 个顶点 $v_j$ 与 $v_i$ 相对应，并且对于 $G_1$ 的每条边 $e_i$，在 $G_2$ 中只有 1 条边 $e_j$ 与 $e_i$ 相对应，可以表示为

$$M:G_1\rightarrow G_2$$

$$\text{s.t.}\begin{cases}\forall v_i\in G_1,\exists!\ v_j\in G_2\,|\,v_j=M(v_i)\\ \forall e_i\in G_1,\exists!\ e_j\in G_2\,|\,e_j=M(e_i)\end{cases}$$

这里，查询局部结构作为模型库中零件的子部分被认为合理，而反之则不成立，因此，该映射是一个单射而非双射。

给定 2 个图 $G_1$、$G_2$，其中 $G_1$ 为子图，$G_2$ 为大图。设置一个映射匹配矩阵 $\boldsymbol{M}_{m\times n}$（$m=|G_1|$，$n=|G_2|$），$\boldsymbol{M}_{m\times n}$ 中任意一个元素 $m_{i,j}$ 的取值可以是 0 或 1。其中，$|G_i|$（$i=1,2$）表示图 $G_i$ 的顶点个数，$\boldsymbol{M}_{m\times n}$ 表示图 $G_1$ 与 $G_2$ 顶点间的对应关系

$$m_{i,j}=\begin{cases}1 & \text{（如果图 } G_1 \text{ 中顶点 } i \text{ 与图 } G_2 \text{ 中顶点 } j \text{ 相匹配）}\\ 0 & \text{（其他）}\end{cases}$$

判断图 $G_1$、$G_2$ 是否子图同构，实际上就是看能否找到一个映射匹配矩阵 $\boldsymbol{M}_{m\times n}$，使其满足如下 2 个条件：每一行有且只有 1 个 1；每一列至多只有 1 个 1。如果找到满足上述 2 个条件的映射匹配矩阵 $\boldsymbol{M}_{m\times n}$，则说明图 $G_1$ 与 $G_2$ 子图同构。

#### 2.1.1　顶点映射匹配矩阵 $\boldsymbol{M}_{m\times n}$ 初始化

在计算特征属性邻接图 $G_1$、$G_2$ 顶点映射匹配矩阵 $\boldsymbol{M}_{m\times n}$ 时，引入了较多的特征属性。在这些属性中，有的属性只要不同就可以将它们的顶点映射匹配矩阵元素 $m_{i,j}$ 置为 0，如特征类型。若图 $G_1$ 中第 $i$ 个顶点对应的特征类型为通槽，而图 $G_2$ 中第 $j$ 个顶点对应的特征类型为孔，则可以置映射匹配矩阵 $\boldsymbol{M}_{m\times n}$ 第 $i$ 行第 $j$ 列元素 $m_{i,j}$ 为 0。这样在局部结构相似性评价之初，尽可能多地排除那些不可能的顶点对应关系，以降低搜索空间的复杂度。

#### 2.1.2　算法基本步骤

在顶点映射匹配矩阵初始化基础上，进行子图同构匹配搜索，具体步骤如下：

（1）辅助顶点集合定义

设置 2 个辅助的顶点集合 $V_1$ 和 $V_2$，分别用于存储搜索过程中 2 个图上已匹配上的顶点，初始时都置空；另外需要设置一个元素为 $V_2$ 的集合 $V_3$，用于存储可能出现多种匹配的情况，初始时也置空。

（2）匹配搜索

搜索从映射匹配矩阵 $\boldsymbol{M}_{m\times n}$ 的第一行开始，从左到右寻找值为 1 的列。对于任意的第 $i$ 行，如果其第 $j$ 列的值为 1，并且该列没有被占用，则表示找到 1 个可能匹配的顶点对，即图 $G_1$ 的第 $i$ 个顶点和图

$G_2$的第 $j$ 个顶点对应,将这 2 个顶点分别加入到顶点集合 $V_1$和 $V_2$。

(3)匹配有效性判断

如果新加入的这 2 个顶点在最终的同构映射中确实是对应匹配的顶点对,那么当前时刻由图 $G_1$中已匹配上的顶点集合 $V_1$构成的子图与图 $G_2$中已匹配上的顶点集合 $V_2$构成的子图必定也是同构的。根据这一原理,可以通过测试当前 $V_1$构成的子图与 $V_2$构成的子图是否同构来检测新找到的列是否有效。

(4)匹配搜索循环

若 $V_1$构成的子图与 $V_2$构成的子图同构,则说明新找到的列是有效的,设置占用标志,进入下一行;否则,在当前行继续寻找下一个有效列;如果当前行搜索完毕都没有找到一个有效列,则退回上一行,并且从上一行已经占用列的下一列开始搜索。

### 2.1.3 算法分析

上述子图同构算法的时间复杂度主要集中在“大图”中寻找“子图”,而子图同构问题是 NP 完全问题,现有求解算法的时间复杂度一般比较高。本文算法在最好情况下只需对映射矩阵进行一轮无回溯搜索,此时对应的时间复杂度为 $\boldsymbol{O}(m)$,最差情况下需要遍历映射矩阵所有可能分支,时间复杂度为 $\boldsymbol{O}(n!/(n-m)!)$,其中 $m$ 为子图顶点数目,$n$ 为大图顶点数目。

为提高匹配效率,本文在设计算法时充分利用特征属性邻接图中的特征属性,使得初始映射匹配矩阵 $\boldsymbol{M}_{A\times I}$中的元素尽可能多的为 0,大大降低了搜索空间的复杂度;并且在动态搜索过程中,每前进一步,获得一个可能匹配的顶点对之后,利用 2 个图中当前已匹配上的顶点集合组成的 2 个子图应该是同构这一原理,迅速对该顶点对匹配关系的有效性进行判断,无需等到所有顶点都对应齐全之后再集中判断是否同构,尽早丢弃不可能最终匹配的顶点对,加速了搜索的进程。

## 2.2 融合设计语义的特征相似性评价

特征的精细化比较是三维 CAD 模型局部结构相似性评价的基础。为有效地实现特征的精细化比较,基于分析设计特征语义信息模型相似性比较中用到的属性信息,设计了一个能够描述不同层次信息的特征描述子,并对特征描述子的各组成要素进行量化,然后将多种属性融合构建设计特征的相似性评价模型。该特征描述子被定义为一个 5 维向量,包括从高层次的设计语义信息到低层次的几何信息。高层的设计语义信息包括设计特征类型、公差/表面粗糙度和特征邻接关系,低层几何信息包括几何尺度和几何形状信息。由于上述组成要素具有不同的内涵和测度,在进行特征的相似性评价时,各组成要素的评价需按如下规则进行。

(1)特征类型

如果 2 个相比较设计特征的类型不同,则认为 2 个特征的相似度为 0,即特征不相似。如果特征类型相同,则特征类型的相似度为 1。设 2 个相比较特征分别为 $F_1$和 $F_2$,特征类型相似度表示为

$$S_F=\begin{cases}0 & (F_1\neq F_2)\\ 1 & (F_1=F_2)\end{cases} \tag{1}$$

(2)公差/表面粗糙度

在零件详细设计阶段,公差/表面粗糙度与特征所能实现的功能、行为等密切相关。对于几何形状完全相同的 2 个设计特征,如果尺寸精度差异比较大,则对应的功能、行为可能非常不同。公差/表面粗糙度的相似度表示为

$$S_R=\frac{1}{2}\left(1-\frac{|T_1-T_2|}{\max(T_1,T_2)}\right)+\frac{1}{2}\left(1-\frac{|\lg R_1-\lg R_2|}{\max(\lg R_1,\lg R_2)}\right) \tag{2}$$

式中 $T_1$、$T_2$——2 个相比较特征基本属性中公差最高等级

$R_1$、$R_2$——2 个特征表面粗糙度最小值

(3)拓扑邻接关系

设计特征间的邻接关系在三维 CAD 模型的相似性评价中占有重要的地位,在几何形状相似的前提下,具有相同邻接关系的设计特征从设计重用角度讲则更为相似。2 个设计特征间邻接关系的相似度表示为

$$S_L=\frac{n_e}{\max(n_1,n_2)} \tag{3}$$

式中 $n_e$——2 个特征中相融边数量

$n_1$、$n_2$——与 2 个相比较特征相连接的特征数量

相融边是指在特征邻接属性图中,如果一对边分属类型相同的 2 个设计特征,这 2 个设计特征分属不同的三维 CAD 模型,且每条边所连接的 2 个设计特征的类型相同,则称该对边相融。

(4)几何尺度

相同特征类型的设计特征,尺度不同可能导致其重用价值完全不同。例如,形状相似的 2 个孔,但是其深度或广度存在比较大的差异,导致其体积存在较大的不同,相应的几何驱动参数也存在较大的差异,可重用价值相对较小。因此,在模型局部结构的相似性评价中同样需要考虑尺度信息。

2 个相比较特征之间的几何尺度相似度 $S_Q$用其最小包围盒(Oriented bounding box,OBB)来评价,即

$$S_Q = \frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3}\left(1 - \frac{|a_i - b_i|}{\max(a_i - b_i)}\right) \tag{4}$$

式中　$a_i$、$b_i$——相比较的 2 个设计特征的最小包围盒的长、宽、高

(5)几何形状

对于相同类型的设计特征,其几何形状可能存在差异。从设计重用角度来讲,形状相似是设计重用的前提。因此,为了计算设计特征形状的差异性,本文采用形状分布算法[16]对设计特征的几何形状进行比较。通过对模型表面随机取点,统计随机点间的距离(D2)作为度量尺度并形成分布曲线。形状相似度 $S_D$ 采用推土机距离(Earth mover's distance, EMD)计算,EMD 距离是一种有效且越来越被广泛使用的集合间或向量间距离计算方式[17],即

$$S_D = 1 - \mathrm{EMD}(H_1, H_2) \tag{5}$$

其中　$H_1 = \{h_{11}, h_{12}, \cdots, h_{1n}\}$

$H_2 = \{h_{21}, h_{22}, \cdots, h_{2m}\}$

式中　$H_1$、$H_2$——2 个相比较特征的形状分布曲线

综上,2 个特征 $F_1$ 与 $F_2$ 的相似度用 $\delta$ 表示,定义为特征类型、公差/表面粗糙度、邻接关系、几何尺度与形状相似度的加权和,即

$$\delta = \begin{cases} 0 & (F_1 \neq F_2) \\ \sum\limits_{g \in Descriptor} \omega_g S_g & (F_1 = F_2) \end{cases}$$

其中

$$\sum_{g \in Descriptor} \omega_g = 1 \tag{6}$$

式中　$\omega_g$——各分量的权重系数

当特征类型不同时,$\delta$ 等于 0,无需进行其他属性(公差/表面粗糙度、邻接关系、形状等)的比较,以简化特征相似性比较过程。

### 2.3　局部结构相似度计算

当局部结构 $P_1$ 与 $P_2$ 之间的一个成功匹配被找到后,需要基于 $M$ 以及其匹配顶点对的属性来计算 2 个局部结构的相似度。对于任意一个匹配顶点对 $(v_i, M(v_i))$,其特征相似度计算公式为

$$S_C(M) = \sum_{(v_i, M(v_i)) \in M} \omega_i \delta(v_i, M(v_i))$$

其中

$$\sum_{(v_i, M(v_i)) \in M} \omega_i = 1 \tag{7}$$

式中　$\omega_i$——顶点 $v_i$ 的权重

$\delta(v_i, M(v_i))$——匹配顶点对的特征相似度

2 个局部结构的相似度定义为所有匹配顶点对特征相似度的加权和,匹配顶点对权重 $\omega_i$ 采用启发式规则设定。根据面向设计重用的三维 CAD 模型局部检索需求特点,在特征属性邻接图中,相似度相同的顶点权重相等,且相似度越大的顶点权重越大。

## 3　算法验证与讨论

为了验证算法的有效性,以 Microsoft Visual Studio 2010 为集成开发环境,Open CASCADE 为几何平台,实现本文算法,实验中所使用模型主要来自于普渡大学的 ESB (Engineering shape benchmark)[18]模型库和项目组成员根据国家科技支撑计划项目"农机专业底盘数字化设计技术研究与示范"构建的农机专业底盘零部件模型库。

表 1 所示为对图 1 中的模型提取的特征描述子信息,包括特征类型、公差/表面粗糙度、特征邻接关系等设计语义信息和几何尺度、几何形状等几何信息。

**表 1　模型特征描述子信息**

**Tab. 1　Information of model feature descriptor**

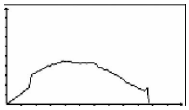
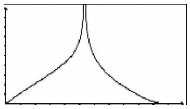
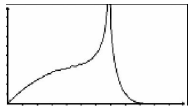
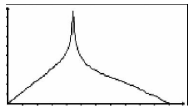
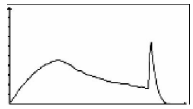
| | | ① | ② | ③ | ④ | ⑤ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 语义信息 | 类型 | CircularBoss | ComplexHole | CircularBoss | ThroughHole | ThroughSlot |
| | 公差 | 8 | 6 | 8 | 7 | 7 |
| | 表面粗糙度 | 6.3 | 3.2 | 6.3 | 3.2 | 3.2 |
| | 拓扑邻接 | ②③④⑤ | ① | ①④ | ②③ | ① |
| 几何信息 | 最小包围盒 | (170,170,30) | (30,30,30) | (100,100,60) | (30,30,90) | (50,40,30) |
| | D2 |  |  |  |  |  |

表 2 所示为从模型中选取红色标记的局部结构对其进行检索,得到本文算法与文献[10]算法检索结果的比较。该局部结构由 1 个非圆凸台和 2 个通孔组成,文献[10]算法基于面属性邻接图,可以精确地查找到 5 个包含该局部结构的三维模型,而本文算法基于特征属性邻接图,除了可以精确查找到这 5 个模型外,还返回了和查询局部结构特征相同、形状不同的 3 个模型,可更好地指导企业参考并重用已有模型。同时,由于模型特征的数目小于面的数目,本文算法效率高于文献[10]算法。

表 2 两种算法检索结果的比较

Tab. 2 Comparison of two kinds of algorithms retrieval results

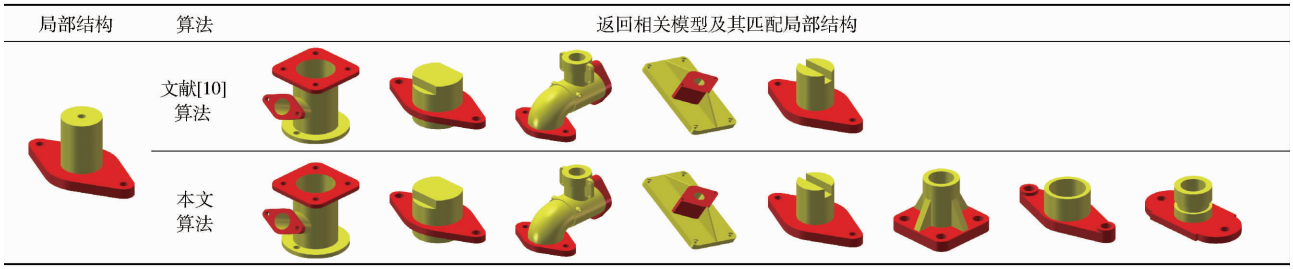



表 3 所示为从模型库中分别选取 2 个典型的局部结构对其进行局部检索,得到排列在前 6 个模型的结果,可以将模型库中包含检索局部结构的模型全部检索出来,并按相似度大小进行排序,检索效果较好。其中叉形局部结构由 8 个特征组成,盘形局部结构由 5 个特征组成,这些返回的局部结构通常隐藏在外形各不相同的三维 CAD 模型中,设计人员难以通过已有商用 CAD 系统中预览所有三维 CAD 模型交互地去发现,并对它们进行重用。但是,通过本文方法可以有效地对这些局部结构进行提取,并且相匹配的局部结构用红色进行标识,而与这些局部结构关联的设计信息(如功能、装配关系、装配特征、有限元分析结果等)均可以推送给设计人员,供设计人员参考[19-20]。

表 3 局部结构检索实例

Tab. 3 Retrieval examples of part structure

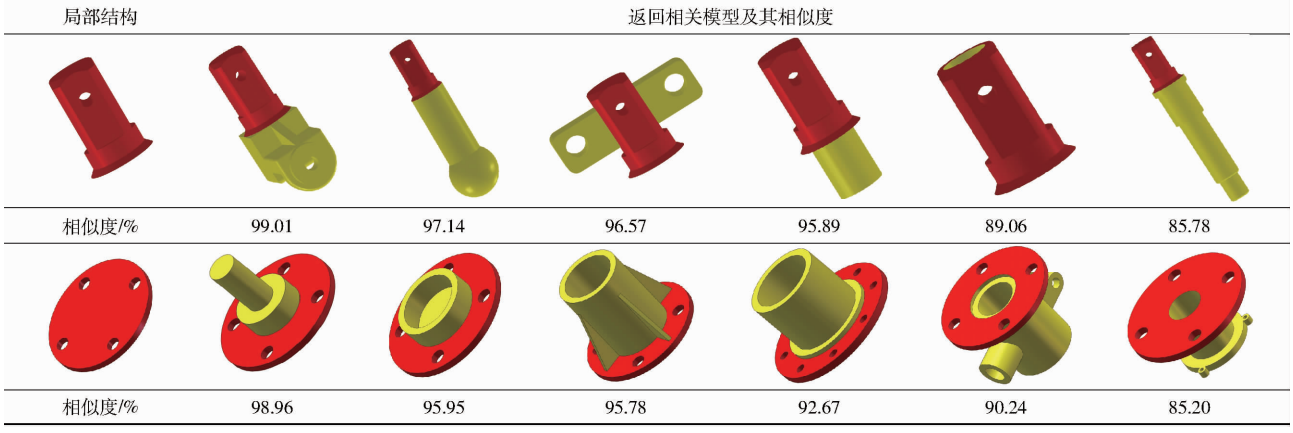



图 2 给出了局部结构检索结果的查全查准率图[18]。由于检索结果中包含了与各查询局部结构相关的所有零件模型,因此,其查准率均为 1.0。从图 2 可以看出,当查全率小于 0.7 时,平均查全查准率曲线接近于查准率为 1.0 的水平线,这意味着随着检索到的相关局部结构数量的增加,局部结构检索的精度能够维持在一个较高的水准。此外,当查全率为 1.0 时,查准率达到了 0.82。理想检索结果的曲线应该是一条查准率恒等于 1.0 的平行直线。显然,位置靠上的曲线具有较高精度,代表着较好的检索结果。因此,本文局部结构检索算法的性能较好。

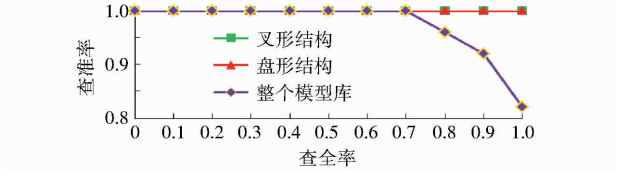



图 2 局部结构检索结果的查全查准率曲线

Fig. 2 Precision-recall curve of part structure retrieval results

为了充分验证本文算法局部结构的检索性能,图 3 给出了 2 个查询局部结构在不同数量的测试模型库下的检索运行时间,该测试在配有 Intel Pentium 4 CPU 3.06 GHz 和 4 GB 内存的计算机上运行。实验中通过随机抽取的方式构建 8 组测试模型库,每组模型库中模型的数量分别为 50、100、…、400。为了保证统计时间的可靠性,对于每一个查询局部结构与每一个测试模型库,先后运行 100 次并将 100 次检索时间的平均值作为该查询局部结构在该模型库下的检索时间。由图 3 可以看出,检索运行时间与测试模型库中相关局部结构的数量基本呈线性关系。这主要由于大部分非相关零件模型在映射匹配矩阵初始化阶段就被排除在外,只有保留下来的极少量零件模型才会进行后续的特征精细化比较。并且在所有的查询局部结构中,局部结构所包含的特征的数量越多所需的查询时间也越多。当测

试模型库包含有 400 个模型时，查询叉形局部结构的运行时间最长，为 10.615 s。对于多数 CAD 模型其构成特征的数量是有限的，因此，本文算法运行效率较高且是可行的。

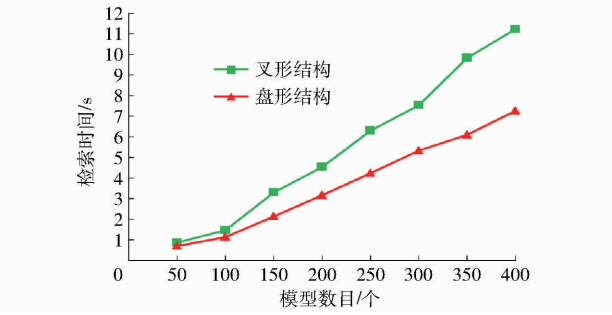



图 3　局部结构检索运行时间

Fig. 3　Runtime of part structure retrieval

## 4　设计重用实例

履带式联合收获机底盘变速箱主要由箱体、轴类零件、齿轮、轴承及键等组成。在变速箱的设计过程中，首先根据收获机底盘的功率、转速等设计要求得到变速箱的设计参数，并计算得出所需要的齿轮、轴类等零件，同时结合收获机底盘传动系统布置方案规划该类零件的空间位置；然后根据其空间位置要求设计变速箱箱体。其中，轴类零件结构简单，齿轮、轴承及键等一般是标准件，不需要进行单独设计，而变速箱箱体形状复杂、不规则，存在重复设计的现象。应用本文方法可以使设计人员从海量的模型中快速、准确地找到满足变速箱箱体设计重用需求的可重用模型或局部区域，从而利用这些资源高效地设计出满足要求的新产品。

首先，根据变速箱已设计零件，考虑其尺寸以及空间位置，设计如图 4 所示的变速箱箱体简单设计模型局部结构，作为搜索对象，在模型数据库中，执行三维 CAD 模型局部结构检索，寻找具有相似设计特征的模型作为设计参考，如表 4 所示，可以将模型库中包含局部结构的模型全部检索出来。通过分析和比较搜索结果模型与输入的待搜索简单模型，由人工在返回相关模型中挑选出与变速箱箱体简单设计模型基本外形、结构、功能最相似的模型进行下一阶段的设计重用。

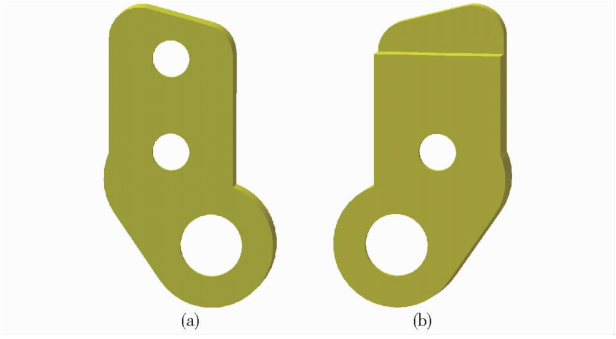
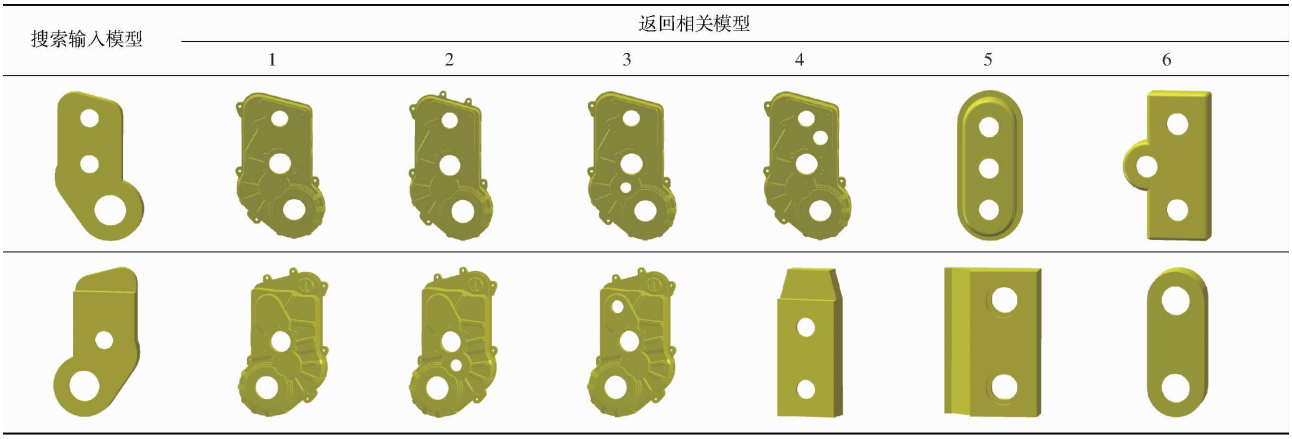



图 4　变速箱箱体简单设计模型局部结构

Fig. 4　Part structure of transmission case body primary model

**表 4　设计重用实例**

**Tab. 4　Instance of design reuse**




得到设计特征匹配的变速箱箱体零件后，需要根据尺寸、连接判断能否可以直接重用。若不可以直接重用，则将相似度最高的搜索结果导入 CAD 系统后对其进行编辑和修改，最后在 CAD 系统中完成变速箱的数字化装配，如图 5 所示为在 Pro/E 软件系统完成的变速箱设计。同理，履带式联合收获机底盘的其他零部件，如车架、车桥、悬架、离合器、驱动桥等，均可以通过本实例所展示的方法进行设计重用。设计者只需构造简单的基体结构，通过局部检索及重用可以方便、快速地完成最终设计。这种“模糊模式”下的检索特性为详细设计阶段的用户提供了很大的方便性和灵活性，图 6 所示为在 CAD 系统中完成的履带式联合收获机底盘模型。

## 5　结束语

针对目前三维 CAD 模型检索方法忽视产品数

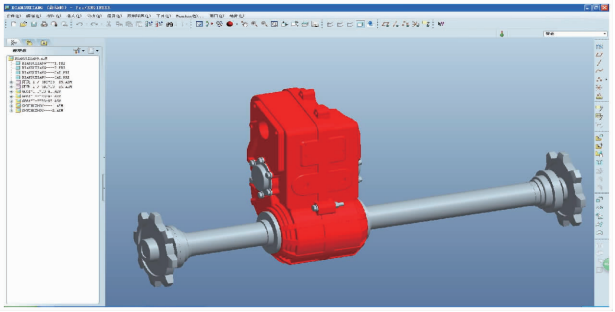


图 5 变速箱装配图

Fig. 5 Transmission case assembly drawing

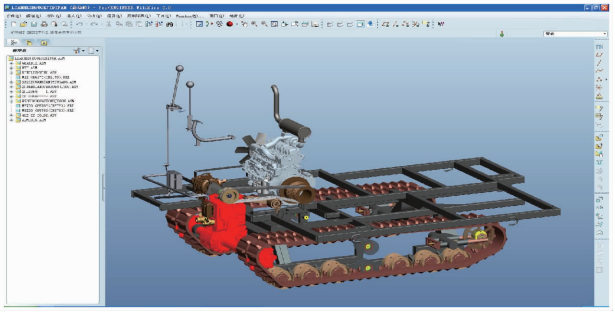


图 6 某履带式联合收获机底盘模型

Fig. 6 Tracked combine chassis model

字化设计中局部结构的检索需求,同时为了解决现阶段融合语义的三维 CAD 模型检索难以捕捉设计信息、缺乏对设计语义信息深入考虑的问题,实现产品详细设计阶段设计资源的有效重用,提出了融合语义的三维 CAD 模型局部结构检索方法。该方法首先以设计特征作为设计语义信息的基础载体,将三维 CAD 模型进行具有设计语义信息的设计特征结构化表征,并且用特征属性邻接图来表示和描述,这样三维 CAD 模型局部结构检索问题就转换为查询局部结构与模型库中零件的特征属性邻接图子图同构匹配问题;然后,设计包含不同层次信息的特征描述子,构建融合语义的设计特征相似性评价模型;最后,基于设计特征相似性评价模型,采用子图同构算法计算查询局部结构与模型库中零件的特征属性邻接图的特征匹配对,计算相匹配局部结构之间的相似度。实验结果表明,融合语义的三维 CAD 模型局部结构检索方法能够为设计者提供方便、灵活的查询方式,帮助其利用简单的查询实例查找满足设计重用需求的完整可重用区域,能够极大地加速那些包含较多独立功能区域的复杂 CAD 模型的设计,且较好地保证相应设计的正确性。

## 参 考 文 献


1 IYER 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 张开兴,黄瑞,刘贤喜. 基于距离-夹角形状分布的三维 CAD 模型检索算法[J/OL]. 农业机械学报,2014, 45(4):317 – 320. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20140450&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.050.
ZHANG Kaixing, HUANG Rui, LIU Xianxi. 3D CAD model retrieval algorithm based on distance and angle distributions[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4):317 – 320. (in Chinese)

3 REGLI W C, SPAGNUOLO M. Introduction to shape similarity detection and search for CAD/CAE applications [J]. Computer-Aided Design, 2006, 38(9):937 – 938.

4 HUANG R, ZHANG S, BAI X, et al. An effective subpart retrieval approach of 3D CAD models for manufacturing process reuse [J]. Computers in Industry, 2015, 67: 38 – 53.

5 张欣, 莫蓉, 陈涛, 等. 面向设计意图不变的三维 CAD 模型重用方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(10): 1356 – 1362.
ZHANG Xin, MO Rong, CHEN Tao, et al. Design intent preserved reuse of 3D CAD models[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2012, 24(10):1356 – 1362. (in Chinese)

6 BESPALOV D, REGLI W C, SHOKOUFANDEH A. Local feature extraction and matching partial objects [J]. Computer-Aided Design, 2006, 38(9):1020 – 1037.

7 BIASOTTI S, MARINI S, SPAGNUOLO M, et al. Sub-part correspondence by structural descriptors of 3D shapes [J]. Computer-Aided Design, 2006, 38(9):1002 – 1019.

8 BAI J, LIU Y S, GAO S M. Multi-mode solid model retrieval based on partial matching [C]// The 10th IEEE International Conference on Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2007: 126 – 131.

9 CHEN X, GAO S M, GUO S, et al. A flexible assembly retrieval approach for model reuse [J]. Computer-Aided Design, 2012, 44(6):554 – 574.

10 陶松桥, 王书亭, 郑坛光, 等. 基于非精确图匹配的 CAD 模型搜索方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2010, 22(3):545 – 552.
TAO Songqiao, WANG Shuting, ZHENG Tanguang, et al. CAD model retrieval based on inexact graph matching[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2010, 22(3):545 – 552. (in Chinese)


(下转第 375 页)

manipulator[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2015, 31: 40 – 50.

13 牛雪梅,高国琴,刘辛军,等. 三自由度驱动冗余并联机构动力学建模与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(16):31 – 41.
NIU Xuemei, GAO Guoqin, LIU Xinjun, et al. Dynamics modeling and experiments of 3 – DOF parallel mechanism with actuation redundancy[J]. Transactions of the CSAE,2013,29(16):31 – 41. (in Chinese)

14 张清华,张宪民. 平面 3 – RRR 柔性并联机器人残余振动主动控制[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(2):232 – 237,266. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20130242&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.042.
ZHANG Qinghua, ZHANG Xianmin. Active residual vibration control of planar 3 – RRR flexible parallel robots [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(2):232 – 237, 266. (in Chinese)

15 黄田,汪劲松,WHITEHOUSE D J. Stewart 并联机器人位置空间解析[J]. 中国科学(E 辑),1998,28(2):136 – 145.
HUANG Tian, WANG Jinsong, WHITEHOUSE D J. Workspace resolution on Stewart parallel mechanism [J]. Science in China (Series E),1998,28(2):136 – 145. (in Chinese)

16 梅江平,高奔,谭杨,等. 3 – SPR 并联机构运动学分析[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(8):215 – 220. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20120839&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.08.039.
MEI Jiangping, GAO Ben, TAN Yang, et al. Kinematic analysis of 3 – SPR parallel mechanism [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(8):215 – 220. (in Chinese)

17 崔国华,周海栋,王南,等. 基于 Isight 的 3 – UPS – S 并联机器人机构多目标优化[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(9):261 – 266. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20130945&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.09.045.
CUI Guohua, ZHOU Haidong, WANG Nan, et al. Multi-objective optimization of 3 – UPS – S parallel mechanism based on Isight [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(9):261 – 266. (in Chinese)

18 LEE K M, SHAH D K. Dynamic analysis of a three degrees of freedom in parallel actuated manipulator[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation,1988,4(3):361 – 367.

19 张彦斌,张树乾,吴鑫. 3 – CRPa 移动并联机构运动学分析与仿真[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(7): 200 – 205. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20120737&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.07.037.
ZHANG Yanbin, ZHANG Shuqian, WU Xin. Kinematic analysis and simulation of 3 – CRPa translational parallel mechanism [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(7): 200 – 205. (in Chinese)

20 冯李航,张为公,龚宗洋,等. Delta 系列并联机器人研究进展与现状[J]. 机器人,2014,36(3): 375 – 384.
FENG Lihang, ZHANG Weigong, GONG Zongyang, et al. Developments of Delta-like parallel manipulators—a review[J]. Robot,2014,36(3): 375 – 384. (in Chinese)

21 高名旺,张宪民,刘晗. 3 – RRR 高速并联机器人运动学设计与实验[J]. 机器人,2013,35(6):716 – 722.
GAO Mingwang, ZHANG Xianmin, LIU Han. Experiment and kinematic design of 3 – RRR parallel robot with high speed [J]. Robot,2013,35(6):716 – 722. (in Chinese)

(上接第 412 页)

11 LI M, ZHANG Y F, QIU Z M. Toward effective mechanical design reuse: CAD model retrieval based on general and partial shapes [J]. Journal of Mechanical Design, 2009, 131(12):1 – 8.

12 BAI J, GAO S M, TANG W H, et al. Design reuse oriented partial retrieval of CAD models [J]. Computer-Aided Design, 2010, 42(12):1069 – 1084.

13 SUNIL V B, AGARWAL R, PANDE S S. An approach to recognize interactiong features from B-Rep CAD models of prismatic machined parts using a hybrid (graph and rule based) technique[J]. Computer in Industry, 2010, 61(7):686 – 701.

14 QUINTANA V, RIVEST L, PELLERIN R, et al. Will model-based definition replace engineering drawings throughout the product lifecycle? A global perspective from aerospace industry [J]. Computers in Industry, 2010, 61(5): 497 – 508.

15 ALEMANNI M, DESTEFANIS F, VEZZETTI E. Model-based definition design in the product lifecycle management scenario [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 52(1):1 – 14.

16 OSADA R, FUNKHOUSER T, CHAZELLE B, et al. Shape distributions[J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(4): 807 – 832.

17 陈纯. 计算机图像处理技术与算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

18 JAYANTI S, KALYANARAMAN Y, IYER N, et al. Developing an engineering shape benchmark for CAD models [J]. Computer-Aided Design, 2006, 38(9):939 – 953.

19 MA L J, HUANG Z D, WANG Y W. Automatic discovery of common design structures in CAD models [J]. Computers & Graphics, 2010, 34(5): 545 – 555.

20 SHAO Y, LIU Y, LI C. Intermediate model based efficient and integrated multidisciplinary simulation data visualization information reuse [J]. Advances in Engineering Software, 2015, 90:138 – 151.