

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201712045



融合装配信息的三维装配 模型检索方法

乔虎, 吴庆云, 杜江, 白瑀

(西安工业大学 机电工程学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 针对现有三维装配模型检索方法存在语义不符、准确性低、检索效率低等问题,提出一种融合装配信息的三维装配模型检索方法. 首先,进行装配信息检索,利用符号化的编码表示装配信息,查找零件的编码以找出符合装配设计意图的三维模型. 然后,利用装配零件之间存在的共轭关系,将装配零件的几何检索转化为查找符合共轭子图的属性邻接图,通过零件的属性邻接图进行模型检索. 最后,利用频繁子图挖掘方法,提取出满足共轭子图的属性邻接图,用作模型的重用. 实验结果表明:该方法能够较好地实现三维装配模型的检索,可以有效地支持面向装配零件的模型重用.

关键词: 三维装配模型检索; 装配信息; 属性邻接图; 共轭关系; 频繁子图

中图分类号: TP 391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2018)04-0526-06

3D Assembly Model Retrieval Method Using Assembly Information

QIAO Hu, WU Qingyun, DU Jiang, BAI Yu

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A 3D assembly model retrieval method based on 3D assembly information was proposed to deal with semantic mismatch, poor accuracy, and low efficiency in existing 3D assembly model retrieval methods. First, for assembly information retrieval, the assembly information was represented by the symbolic coding and the 3D models which conform to the design intention of the assembly were found by searching the code. Then, on the basis of the conjugation relationship among the assembly parts, the assembly model geometric retrieval was translated into a problem of finding attributed adjacency graph of conforming to conjugated sub-graph, and models were searched by model's attributed adjacency graph. Finally, the frequent sub-graph mining method was used to search the attributed adjacency graph conforming to conjugated sub-graph for models reuse. Experimental results show that the method can effectively support 3D assembly model retrieval for assembly models reuse.

Keywords: 3D assembly model retrieval; assembly information; attributed adjacency graph; conjugate relations; frequent sub-graph

在智能制造的大环境下,企业对制造过程数字化、智能化的要求越来越高. 因此,如何重用三维装配模型信息成为当前的研究热点. 三维装配模型检索方式多以确定粒度的装配模型为重用基础,如基于形

收稿日期: 2017-12-21

通信作者: 乔虎(1986-),男,讲师,博士,主要从事数字化设计制造及三维模型检索的研究. Email: qiaonwpu@hotmail.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51705392); 西安工业大学校长基金资助项目(XAGDXJJ16004)

状的检索^[1]、基于拓扑结构的检索^[2]等. 对装配模型检索而言, 除模型几何相似性的比较, 还应考虑模型的语义信息. 董雁等^[3]将装配零件表面赋予功能和结构双重属性, 兼顾零件的形状和功能属性的相似性. 张应中等^[4]提出装配设计意图的语义表示, 为设计意图信息的交换、理解语义查询和智能推理奠定基础. Hilaga 等^[5], Tung 等^[6]提出基于三角形网格图的拓扑匹配方法. 黄瑞等^[7]以制造特征为基础语义对象, 将三维模型进行结构化表示, 提取用于相似性比较的结构化三维模型的属性信息. Sundar 等^[8]提出一种通过距离变换得到骨架图的方法, 利用骨架图进行模型匹配. 许建豪^[9]为提升检索结果与用户个性化需求的符合程度, 依托向量空间模型提出一种新的检索方法. 伍英杰等^[10]提出基于空间结构相似性的三维模型检索方法, 综合产品模型属性特征相似度和零件空间位置相似度, 得到装配体的相似度. 陈叶旺等^[11]基于农业领域本体和词汇, 给出针对农业领域的语义检索改进模型. 然而, 上述方法都是基于语义或基于几何条件的单因素检索方法, 没有考虑两者复合检索效果. 因此, 本文针对三维装配模型检索的特点, 在语义检索和几何检索的基础上, 提出一种融合装配信息的三维装配模型检索方法.

1 基本概念

1.1 装配设计总体思路

首先, 对用编码表示的装配信息进行检索, 初选出符合装配设计意图的模型, 达到精简模型库的目的. 然后, 进行基于图同构的精确检索, 提取几何结构匹配的装配零件, 如图 1 所示.

1.2 装配设计信息的表达

结合装配零件的连接关系、装配零件的运动关系、装配零件空间定位约束和装配零件材料 4 个方面的装配信息, 基本能概括装配设计意图, 表达出装配零件之间的配合关系. 采用文献^[12]的编码方式, 对 4 种装配信息制定规则, 便于计算机的检索.

1.2.1 装配零件的连接类型 零件连接类型可分为螺纹连接(螺钉连接、螺柱连接、螺母连接、特殊螺纹连接); 键槽连接(圆头平键连接、平头平键连接、半圆键连接、楔键连接和切向键连接); 轴孔连接(过盈配合、间隙配合、过渡配合)3 个大类. 螺纹连接用 L 表示; 螺钉、螺柱、螺母和特殊螺纹分别用数字 1, 2, 3, 4 表示, 如 L1 表示螺纹连接中的螺钉连接. 同理, 用 J 表示键槽连接, 用 Z 表示轴孔连接, 字母后面的数字依次表示对应的类型.

1.2.2 装配零件的运动关系 零件之间的运动关系有轴向运动(Z)、周向运动(T)和径向运动(J). 这 3 种运动关系根据传动方式不同, 又可分为齿轮传动、齿轮齿条传动、涡轮蜗杆传动、平面连杆传动、丝杆传动、链传动、带传动、棘轮传动和槽轮传动等, 依次可用数字 1, 2, 3, … 表示, 没有对应传动关系的用 0 表示, 如 T1 表示周向运动的齿轮传动.

1.2.3 装配零件空间定位约束 装配零件要考虑产品的外观形状、功能等, 常常需要零件的空间定位约束, 约束关系分为平面与平面约束(两面平行、两面成角)、平面与曲面约束(平面与柱面相切、平面与球面相切)、曲面与曲面约束, 曲面与同轴约束. 用字母 P, S, M, Z 表示这 4 种约束, 用 PP, PJ 分别表示两面平行、两面成角, 用 SZ, SQ 分别表示平面与柱面相切、平面与球面相切.

1.2.4 装配零件的材料 由于产品的受力情况不同, 装配零件需要不同的材料性能. 根据不同的力学性能和应用场合, 将机械工程常用材料分为铸铁(灰铸铁、可锻铸铁、球磨铸铁)、钢(碳素钢、合金钢、铸钢)、铜合金(铸造铜合金、变形铜合金)、轴承合金(锡基轴承合金、铅基轴承合金)、塑料和橡胶. 同螺纹连接编码方法类似, 分别用字母 Z(Z1, Z2, Z3), G(G1, G2, G3), T(T1, T2), C(C1, C2), S, X 表示.

1.3 几何信息匹配的相关概念

在装配信息检索的基础上, 进行基于几何信息匹配的检索. 由于装配零件之间的配合部分存在共轭关系, 即配合部分的拓扑连接形式相同, 但凹凸性相反^[13], 故可通过零件的属性邻接图, 将三维装配模型检索转化为查找满足共轭子图的属性邻接图, 查找方法采用用频繁子图.

定义 1 属性邻接图. 它是一种用于描述零件几何拓扑关系的图结构, 用 $G=(V, E, \alpha(V))$ 表示. 其



图 1 检索方法示意图

Fig. 1 Retrieving method schematic

中, (V, E) 为无向简单图(既没有环, 也没有重边)^[14]; V 为零件对应的图中的顶点集, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_i\}$, v_i 为零件的第 i 个面; E 为零件对应的图中的边集, $E = \{e_1, e_2, \dots, e_j\}$, e_j 为连接顶点 v_a 和 v_b 的边; $\alpha(v_K)$ 为零件的第 K 个边的属性.

构建零件的属性邻接图时, 根据零件模型的每个面, 对应地创建一个属性邻接图顶点, 并提取两邻接面对应边的属性. 由于文中只考虑三维装配检索, 因此, 主要注重于边的凹凸性.

定义 2 共轭子图. 它是装配零件的配合部分(装配特征)对应的两两属性邻接图, 其拓扑连接形式相同, 但凹凸性相反, 如图 2 所示. 图 2 中: 用椭圆圈起来的部

分(实线和虚线代表凹凸性相反)为装配部分的共轭子图. 采用频繁子图挖掘的方法, 将符合共轭子图的属性邻接图从模型图库中查找出来. 由于查找的图库是经过装配信息检索之后得到的, 因此, 减少了图检索的计算复杂度. 下面给出频繁子图挖掘用到的一些相关概念^[15].

定义 3 图同构. 它有 $G_i = (V_i, E_i)$, $G_j = (V_j, E_j)$ 2 个图. 若二者之间存在映射关系 $f: V_i \rightarrow V_j$, 且有 $e_i = (v_i, v_i')$ 是 G_i 中的一条边, 当且仅当 $e_j = (v_j, v_j')$ 是 G_j 的一条边, 则称 G_i 与 G_j 同构.

定义 4 子图同构. 它对于给定的符号图 G_i 与 G_j , 若有 G_j 的子图 G_j' , G_j' 与图 G_i 同构, 则称 G_i 与 G_j 子图同构.

定义 5 频繁度. 存在图集数据库 $B = \{b_0, b_1, \dots, b_n\}$, 对于子图 b , 令 $\phi(b, b_i) = \begin{cases} 1, & \text{若 } b \text{ 与 } b_i \text{ 子图同构,} \\ 0, & \text{若 } b \text{ 与 } b_i \text{ 中任一子图不同构,} \end{cases}$ $S = \frac{\sum \phi(b, b_i)}{|B|}$. 设 $|B|$ 为图集 B 的基数, $\sum \phi(b, b_i)$ 为 b 与 b_i 同构的总个数, $b_i \in B$, 则 S 即为频繁度.

定义 6 频繁子图. 对于给定的最小频繁度 S_{\min} , 若存在子图 b 满足 $S \geq S_{\min}$, 则称 b 是图集数据库 B 的频繁子图.

2 装配零件检索算法

从高层到低层的多层次进行检索, 依据编码对装配信息的相似度进行评价, 基于图同构对几何结构进一步相似度匹配, 以达到模型重用的目的. 根据上述要求, 总体流程图如图 3 所示.

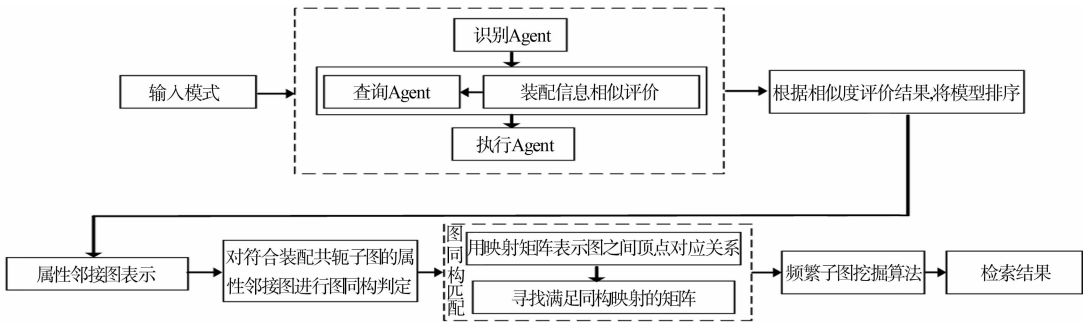


图 3 总体流程图
Fig. 3 Chief flow chart

2.1 装配信息相似性分析及算法

装配零件的连接关系、装配零件的运动关系、装配零件空间定位约束和装配零件的材料 4 种装配信息作为编码的 4 个码位, 可较全面地表达装配设计意图, 体现装配零件之间高层的语义联系, 如图 4 所示. 采用链式编码方案, 每个码位内各装配信息独立, 与前后码位无关. 图 4 中: 数字 1, 2, 3, 4 分别表示连接关系、运动关系、空间约束和材料类型, 称为分类码. 连接关系用一个字母码和一个数字码表示; 运动关系用一个字母码表示; 空间约束用两个字母码表示; 材料类型用一个字母码和一个数字码表示, 这些称为表达码. 在书写编码时, 用“:”将分类码与表达码隔开, 如 1:L1-2:T1-3:PP-4:Z1. 当没有相应的

语义关系时,可将对应分类码置空,如 1;L1-3;PP-4;Z1.

2.1.1 装配信息相似性评价 根据装配信息的编码方案,将装配零件模型编码与目标模型编码进行比较,得到的相同码位数转化为可定性分析的数学模型,从而进行模型相似性评价. 相似度为

$$\varphi_i = \frac{S(C_i \cap C_K)}{\omega_1 N_1 + \omega_2 N_2}, \quad \omega_1, \omega_2 > 0, \quad \omega_1 + \omega_2 = 1. \quad (1)$$

式(1)中: φ_i 为装配零件模型与目标模型的相似度; $S(C_i \cap C_K)$ 为装配零件编码与目标模型编码相同的码位数; N_i 为模型 i 编码的位数; ω_i 为权重系数,可根据不同情况,适当取值. 一般情况下,当 2 个模型的编码位数接近时,权重系数越接近;反之,编码位数较多的那个权重系数偏小.

由式(1)可知:当装配零件模型编码与目标模型编码相同位数越多时,2 个模型的相似度越大.

2.1.2 装配信息检索算法 采用编码识别的方式检索出所需模型,编码与模型之间采用脚本函数连接,使系统能够辨别编码,在模型库中查找与编码接近的模型. 编码作为脚本函数的自变量,模型的检索结果作为函数因变量,在脚本函数内部形成一个映射表,完成自变量到因变量的驱动. 映射表由识别 Agent, 查询 Agent 和执行 Agent 组成,算法包含以下 5 个主要步骤.

步骤 1 由交互方式得到需检索的编码,将编码传入识别 Agent. 若编码不符合系统规则,则结束程序.

步骤 2 识别 Agent 判断编码,得出编码位数、编码对应的装配语义类型,将结果传入查询 Agent.

步骤 3 查询 Agent 根据识别 Agent 输入的结果,对模型库中的编码进行匹配.

步骤 4 根据匹配的结果,计算模型之间的相似度.

步骤 5 执行 Agent 根据相似度的大小,将对应的模型一一列举出,并输出给用户.

2.2 几何信息图匹配分析及算法

为进一步提取装配接口匹配模型,采用基于属性邻接图的检索方法. 它将装配零件模型相似性分析转化为符合共轭子图的属性邻接图相似性分析. 判断 2 个图是否同构,即判断 2 个图定点之间是否存在映射关系. 两点之间存在映射关系可推出图的两边也存在映射关系. 通过图同构可判定图的相似性.

2.2.1 图同构匹配方法 子图同构计算复杂度是一个多项式复杂程度的非确定性(NP)完全问题,采用一种高效的图同构判定方法^[16]. 设图 G_1 和 G_2 , G_1 为需检索的图, G_2 为被检索的图. 图 G_1 的顶点集合 V_1 的顶点个数为 a ,图 G_2 的顶点集合 V_2 的顶点个数为 b ,有 $a < b$. 用 $a \times b$ 的映射 $M_{a \times b}$ 矩阵表示图 G_1 和 G_2 之间的顶点对应关系, $m_{i,j}$ 是映射矩阵 M 中的 i 行 j 列元素. 若 V_1 与 V_2 关联,则 $m_{i,j} = 1$; 否则, $m_{i,j} = 0$. 对于矩阵 $M_{a \times b}$,若存在一个映射,使每一行只有一个 1,每一列不多于一个 1,则矩阵 $M_{a \times b}$ 表示 G_1 和 G_2 之间的同构映射.

图同构的匹配算法有以下 4 个主要步骤.

步骤 1 初始化映射矩阵 M ,并设空集 V_1 和 V_2 ,以保存已匹配到的顶点(对图 G_1 和 G_2 的检索).

步骤 2 从矩阵 M 的第 1 行,从左往右查找值为 1 的列. 对任意的第 i 行,若其第 j 列值为 1,且该列未被占用,则表示找到一个可能的顶点关联关系. 即图 G_1 的第 i 个顶点与图 G_2 的第 j 个顶点对应.

步骤 3 将步骤 2 的 2 个顶点分别加入集合 V_1 和 V_2 .

步骤 4 判断 V_1 和 V_2 中新加入的顶点是否在最终同构映射中对应匹配的顶点对.

若 V_1 和 V_2 中新加入的顶点在最终同构映射中对应匹配的顶点对,则可得到 G_1 中已匹配上的顶点集合 V_1 构成的子图与 G_2 中已匹配上的顶点集合 V_2 构成的子图是同构的. 由此可判断 V_1 构成的子图和 V_2 构成的子图同构.

2.2.2 几何检索方法 在图同构匹配的方法上,采用基于 Apriori 频繁子图挖掘算法,从检索模型库中查找出符合装配特征共轭子图的属性邻接图. 即频繁子图的挖掘实际上是一个图同构匹配过程. Apriori 频繁子图挖掘算法有以下 4 个简要步骤.

步骤 1 连接 K 阶频繁子图,生成 $K+1$ 阶候选子图.

步骤 2 剪切候选 $K+1$ 阶子图集,删除包含 K 阶非频繁子图的所有候选 $K+1$ 阶子图.

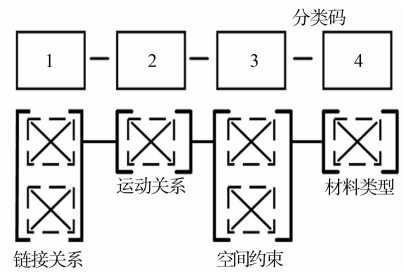


图 4 编码方案
Fig. 4 Coding scheme

- 步骤 3 计算候选 $K+1$ 阶子图集中所有子图的频繁度.
- 步骤 4 删除候选 $K+1$ 阶子图集中频繁度小于 S_{\min} 的候选子图.

从 $K=0$ 开始循环求解,直到不能产生更高阶的频繁子图,即完成频繁子图的挖掘.提取含共轭子图的属性邻接图时,需定义一些符号对算法进行描述,如 C^K 为 K 阶候选频繁子图集合; F^K 为 K 阶频繁子图集合; F^F 为所有频繁子图集合, $F^F=\{F^1,F^2,\cdots,F^n\}$.

频繁子图集输入为图集 B ,频繁度 S_{\min} ;输出为 K 阶频繁子图集合 F^K .其生成的算法如下所示.

- 1) Begin
- 2) $F^{K+1} \leftarrow \phi, C^{K+1} \leftarrow \text{Candidate}(F^K)$ // 产生候选子图
- 3) For $\forall b^{K+1} \in C^{K+1}$ do // 候选精简和频繁度计数
- 4) If $\sigma(b^{K+1}) \geq S_{\min}$ then
- 5) $F^{K+1} \leftarrow F^{K+1} \cup \{b^{K+1}\}$
- 6) End if
- 7) End for
- 8) Return F^K
- 9) End

从 $K=0$ 开始,循环调用该算法,可获取所有频繁子图集合, $F^F=\{F^1,F^2,\cdots,F^n\}$.算法是在 K 阶频繁子图的基础上构建 $K+1$ 阶候选子图,使用 2 个包含 $K-1$ 阶相同频繁子图的 K 阶频繁子图,从而得到 $K+1$ 阶频繁子图.识别 2 个相同 $K-1$ 阶子图和连接 2 个 K 阶频繁子图为该过程中最关键的 2 个步骤.2 个相同 $K-1$ 阶子图的识别,可将所有 $K-1$ 阶频繁子图的 ID 记录在 K 阶频繁子图属性中,通过 2 个 K 阶频繁子图属性值的交集,得到相同的 $K-1$ 阶频繁子图,以避免子图同构的判定.2 个 K 阶频繁子图的连接可以看作是合并 2 个 $(K \times K)$ 的邻接矩阵产生 $(K+1) \times (K+1)$ 邻接矩阵的过程.

3 算法验证

为验证算法的有效性,建立一套计算机辅助设计(CAD)模型库,并对其中零件根据编码方式进行编码,通过 Matlab 软件进行装配零件检索实验.












以活塞液压缸为目标检索对象,在模型库中检索出可与其装配的活塞杆.通过装配信息检索方式进行编码检索,将符合装配设计意图的零件检索出来,如表 1 所示.由表 1 可知:经过语义检索的模型,剔除无关装配零件模型,为基于图同构的检索减少模型数量;经过装配信息检索的模型将有轴孔连接、轴向运动、曲面与曲面约束和合金钢的装配信息零件筛选出.

表 1 装配信息检索
Tab. 1 Assembly information retrieval

检索信息		检索结果及其相似度							
									
正视图	剖视图	100	090	085	080	076	072	069	065
									
装配意图	装配零件	061	058	053	050	049	044	041	035

基于图同构的检索,采用频繁子图挖掘方法,将符合装配共轭子图的属性邻接图提取出来.为验证不同频繁度 S_{\min} 的检索情况,分别在 $S_{\min}=1.00$ 和 $S_{\min}=0.60$ 的情况下进行实验,检索结果如表 2 所示.由表 2 可知:在 $S_{\min}=1.00$ 时,含有装配共轭子图的属性邻接图在所有模型中出现的频率是 100%;相应地,在 $S_{\min}=0.60$ 时,其为 60%;几何信息检索对三维模型的装配接口进行精确的匹配.在模型具有相同装配信息的基础上,利用属性邻接图可表达三维模型拓扑结构的优势,从形状结构上对模型进行检索,并且共轭子图可检索出两两模型有装配关系的配合结构.因此,通过几何信息检索,可较大程度提高模型检索结果的准确性.

表 2 几何信息匹配
Tab. 2 Geometrical information matching

S_{min}	检索结果						
1.00							
0.60							

4 结束语

提出一种融合装配信息的三维装配模型检索方法. 首先, 利用编码检索效率高的特点, 将装配信息以编码的方式表达, 剔除模型库中与装配信息无关的模型, 为下一步进行的几何检索减少工作量. 然后, 基于图同构进行几何结构检索, 采用频繁子图挖掘算法, 提取符合装配共轭子图的属性邻接图. 该方法改善单纯基于图形检索方法的不足, 为三维装配模型检索提出一种新的思路, 其对三维模型的重用具有重要意义.

参考文献:

[1] KIM S W, YOON J, PARK S, *et al.* Shape-based retrieval in time-series databases[J]. *Journal of Systems and Software*, 2006, 79(2): 191-203. DOI: 10. 1016/j. knosys. 2011. 04. 015.

[2] JAIN V, ZHANG Hao. A spectral approach to shape-based retrieval of articulated 3D models[J]. *Computer-Aided Design*, 2007, 39(5): 398-407. DOI: 10. 1016/j. cad. 2007. 02. 009.

[3] 董雁, 徐静. 基于装配结构相似的零件三维模型检索方法[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(4): 273-280. DOI: 10. 3901/JME. 2009. 04. 273.

[4] 张应中, 罗晓芳, 范超. 装配设计意图的语义表示[J]. *计算机集成制造系统*, 2011, 17(2): 248-255.

[5] HILAGA M, SHINAGAWA Y, KOHMURA T, *et al.* Topology matching for fully automatic similarity estimation of 3D shapes[C]// *Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. Los Angeles: ACM, 2001: 203-212. DOI: 10. 1145/383259. 383282.

[6] TUNG T, SCHMITT F. Augmented Reeb graphs for content-based retrieval of 3D mesh models[C]// *Shape Modeling International*. Paris: IEEE Press, 2004: 157-166. DOI: 10. 1109/SMI. 2004. 1314503.

[7] 黄瑞, 张树生, 白晓亮, 等. 融合制造语义的三维 CAD 模型检索方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2013, 19(6): 1177-1185.

[8] SUNDAR H, SILVER D, GAGVANI N, *et al.* Skeleton based shape matching and retrieval[C]// *Shape Modeling International*. Seoul: IEEE Press, 2003: 130-139. DOI: 10. 1109/SMI. 2003. 1199609.

[9] 许建豪. 采用向量空间模型的个性化信息检索方法[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(2): 175-178. DOI: 10. 3901/JME. 2010. 11. 149.

[10] 伍英杰, 高琦. 产品装配体模型的空间结构相似性检索方法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2014, 26(1): 113-120.

[11] 陈叶旺, 李海波, 余金山. 一种基于农业领域本体的语义检索模型[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2012, 33(1): 27-32. DOI: 10. 11830/ISSN. 1000-5013. 2012. 01. 0027.

[12] 许静, 纪杨建, 祁国宁, 等. 支持大批量定制设计的机械零部件分类编码方法[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(11): 149-155. DOI: 10. 3901/JME. 2010. 11. 149.

[13] 肖鸿. 面向复杂产品装配现场的移动三维模型关键技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2014.

[14] BRANDES U. *Network analysis*[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2005.

[15] 张开兴, 张树生, 白晓亮. 三维 CAD 模型公共可重用局部结构自动提取[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2011, 23(9): 1512-1519.

[16] 王飞, 张树生, 白晓亮, 等. 基于子图同构的三维 CAD 模型局部匹配[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2008, 20(8): 1078-1084.