

基于特征的静态装配 CAD 模型全局对称性识别方法

蒋俊锋, 龚沁, 陈正鸣*, 何坤金, 黄瑞

¹⁾ (河海大学物联网工程学院 常州 213022)

²⁾ (常州市图形图像与骨科植入物数字化技术重点实验室 常州 213022)
(zmchen65@hotmail.com)

摘要: 为降低装配 CAD 模型 CAE 分析的运算规模, 提出一种全方位利用装配 CAD 模型的装配关系、以一致构件集为对称性识别单元识别静态装配 CAD 模型全局对称性的方法。首先构建配合图, 同时利用装配关系实现装配体构件局部坐标到全局坐标转换; 然后从装配级、零件级、几何级自上而下地实现一致构件集划分, 再分别利用单约束与多约束规则确定一致构件集对称性; 最后根据一致构件集序列顺序, 通过对称性合并与验证逐步确定装配 CAD 模型全局对称性。实验结果表明, 该方法能有效地识别装配 CAD 模型全局对称性。

关键词: 装配体; CAD 模型; 对称性识别; 装配关系
中图法分类号: TP391.41

A Feature-based Method of Rapidly Detecting Global Symmetries of Static Assembly CAD Models

Jiang Junfeng, Gong Qin, Chen Zhengming*, He Kunjin, and Huang Rui

¹⁾ (College of Internet of Things Engineering, Hohai University, Changzhou 213022)

²⁾ (Key Laboratory of Graphics, Images and Orthopedic Implants, Changzhou 213022)

Abstract: In order to reduce the computation of the CAE analysis on assembly models, a method is proposed to rapidly detect the symmetries of static assembly models by taking full advantage of the assembly relationships. The set of the congruent components is taken as the unit for symmetry detection. First, the mating graph is constructed. By using the assembly relationship, the local coordinates of the components are converted to the global ones. Second, the congruent component sets are partitioned in a top-down style according to assembly, part and geometric levels. And then, the symmetries of the congruent component sets are determined by using the single constraint and multiple constraint rules. Finally, according to the order of the congruent component sets, the global symmetries of the assembly CAD model can be gradually determined by merging and verifying symmetries. Experimental results show that the symmetries of the assemblies can be effectively detected.

Key words: assembly; CAD model; symmetry detection; assembly relationship

识别装配 CAD 模型全局对称性, 能大幅降低装配模型 CAE 分析的运算规模^[1-2], 提高 CAE 分析效率。装配模型中构件规模庞大, 构件之间的关系

十分复杂, 如何提高装配模型的对称性识别效率是关键问题。

装配模型由构件装配而成, 构件是指子装配

收稿日期: 2016-05-09; 修回日期: 2016-10-27。基金项目: 国家自然科学基金青年项目(61403120); 江苏省科技支撑计划(BE2014048); 国家自然科学基金面上项目(61472118); 国家自然科学基金青年项目(51605142)。蒋俊锋(1979—), 男, 博士, 副教授, CCF 会员, 主要研究方向为 CAD&CG; 龚沁(1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为 CAD&CG; 陈正鸣(1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, CCF 高级会员, 论文通讯作者, 主要研究方向为 CAD&CG、数字化设计与制造; 何坤金(1974—), 男, 博士, 副教授, CCF 会员, 主要研究方向为 CAD&CG; 黄瑞(1987—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为 CAD&CG。

模型或零件模型。按照装配模型是否可动,其可分为静态和动态2类。与静态装配模型相比,动态装配模型除了拥有装配特征和设计特征以外,还包含了丰富的运动信息。

面向CAD模型的对称性识别现有方法仅限于零件模型,在公开发表的CAD模型对称性识别工作中,静态装配模型的对称性识别研究仍是空白。本文提出一种基于特征的静态装配模型(以下简称装配体)全局精确对称性识别方法,根据装配体层次化表示特点,全方位利用装配约束和装配特征,以提高对称性识别效率。其中,本文识别的对称性包含反射对称性和旋转对称性,装配体由平面和二次曲面构成,装配体中的零件模型包含特征CAD模型和B-Rep模型。

1 相关工作

随着计算机图形学、CAD/CAE/CAM集成、人工智能以及机器视觉等研究领域相关技术的不断发展,在图像、点云、网格模型的对称性识别中,已提出了模式匹配法^[3-5]、基于图的方法^[6-7]、投票法^[8-9]、形状描述子法^[10-12]、矩阵谱分析法^[13-14]等对称性识别方法。

21世纪初,CAD模型对称性识别方法成为研究热点。根据CAD模型类型不同,识别方法大致可以分为基于面的方法和基于特征的方法。

1) 基于面的方法。现有面向B-Rep模型的对称性识别方法都以面为核心,称之为基于面的对称性识别方法。Tate等^[15]的方法利用环的几何信息,对B-Rep模型的面进行匹配,然后从匹配的面对中提取B-Rep模型的局部对称信息。但该方法仅利用环的属性,无法精确地确定模型对称性,故容易产生误识别。Li等^[16]充分利用B-Rep模型的环信息,计算B-Rep模型所有局部对称,并将B-Rep模型的局部对称作为候选对称,然后通过验证候选对称最终确定全局对称性。因为该方法并没有考虑不相邻面之间的对称性,容易产生对称性误识别。Li等^[17]为检测逆向工程中B-Rep模型的对称设计意图,提出了一种近似对称性识别方法,其先反求B-Rep模型的设计单元,然后通过识别设计单元集的近似局部对称性,最终确定B-Rep模型的对称性。以上对称性识别方法必须先识别所有CAD模型局部对称性,然后通过合并局部对称性

确定CAD模型全局对称性。

2) 基于特征的方法。特征模型中不仅包含CAD模型的边界信息,而且还包含诸如特征类型、特征参数、引用的拓扑元素以及草图等丰富的设计特征(简称特征)信息。因此,在特征CAD模型全局对称性识别方法^[18-19]中,利用特征信息计算特征对称性的规则,并提出特征布尔运算结果对称性的计算规则。利用这2种规则计算特征的对称性,并通过合并与验证特征对称性,最终确定CAD模型的全局对称性,识别效率较高。但由于特征相交会导致相交前后几何形状的对称性不一致,导致该方法难以判定特征相交之后几何形状的对称性。

现有面向装配体的研究中,多采用图或树来表示装配体。图主要用于描述构件的拓扑关系、装配关系以及运动关系,树主要用于描述构件的层次关系。

根据不同研究目的,采用图的类型也不相同。装配序列规划研究中,主要采用连接图^[20]与联络图^[21]描述构件的拓扑关系,也有用图的邻接矩阵^[22]表示构件的拓扑关系;装配体检索研究中,需要同时描述构件的拓扑关系、装配关系、运动关系、构件自由度以及构件几何形状,故采用具有结点属性和边属性的属性图进行描述;装配体公共结构识别研究中,主要采用配合面对图^[23]描述构件关系与构件几何形状。

2 总体方法

2.1 基本概念

1) 一致性。若物体经过刚体变换后与另一个物体完全重合,则称这2个物体一致。

2) 对称性。若物体经过刚体变换与自身重合,则称物体具有对称性,该刚体变换称为对称变换,简称为对称。物体 M 所有对称构成 M 的对称集,记作 $S(M)$ 。

3) 旋转对称性和反射对称性。绕旋转轴作旋转变换后与自身重合的物体,具有旋转对称性。若物体绕旋转轴 a 旋转 $(360/b)^\circ$ 与自身重合,该物体旋转对称性记作 $R_{a,b}$ 。当 $b \rightarrow \infty$, $R_{a,b}$ 表示为 $R_{a,\infty}$, $R_{a,\infty}$ 表示该物体绕旋转轴 a 旋转任意角度都能与自身重合;根据反射对称面作反射变换后与自身重合的物体,具有反射对称性。若物体以面 a 作反射变换与自身重合,该物体反射对称性记作 Z_a 。

2.2 基本思想和总体步骤

装配体是在若干构件上定义装配关系装配而成. 装配关系主要由共轴、共面、偏移等装配约束和镜像、阵列装配特征组成. 其中, 装配约束确定构件在装配过程中的刚体变换, 装配特征根据镜像和阵列方式复制构件. 与零件对称性识别^[17,19]类似, 装配体对称性识别可以采用“分而治之”思想, 即装配体的全局对称性可以由装配后的构件对称性确定, 具体包含构件内部的对称性以及构件之间的对称性(参见文献[19]第 2.1 节). 装配后, 构件的位置和方向由装配体的装配关系确定. 如何全方位多层次利用装配关系, 以确定构件对称性, 并提高装配体对称性识别效率, 是本文的关键问题. 装配体是一种层次化表示结构, 装配体的构件中可能包含子装配体, 子装配体又会进一步包含子装配体. 构件之间的对称性往往可以利用装配关系直接确定, 而无需用到构件的下层信息. 因

此, 本文采用一种由粗到精自顶向下的思想识别装配体对称性. 如图 1 所示, 若构件 c_2 由构件 c_1 镜像复制而成, 则可以直接确定 c_1 与 c_2 之间的一致性与反射对称性, 而无需用到 c_1 和 c_2 下层的信息判定.

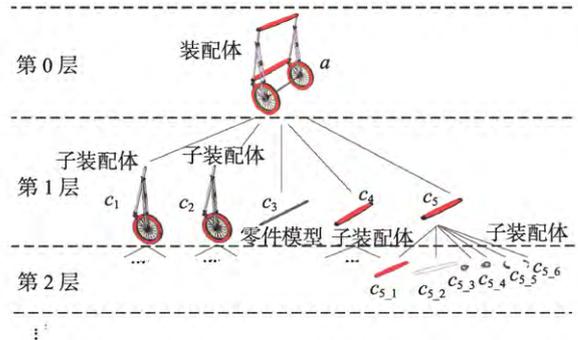
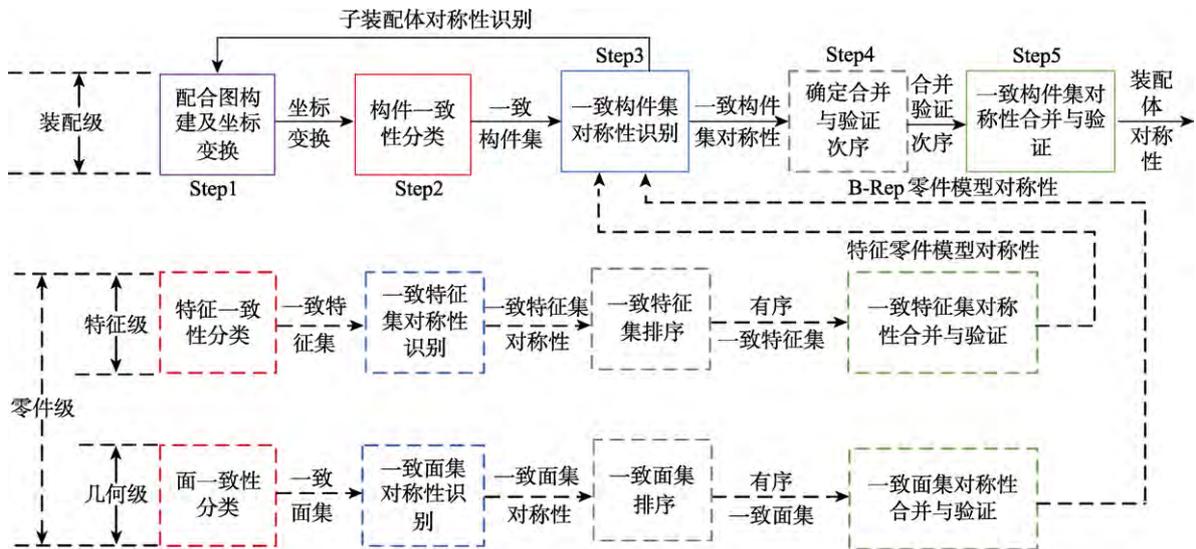


图 1 装配特征树

本文的对称性识别方法总体框架如图 2 所示, 对称性识别总体分为 5 步, 总体介绍如下:



实线: 本文主要工作; 虚线: 已有工作; 颜色相同: 功能类似

图 2 装配体对称性识别总体框架

Step1. 配合图构建及坐标变换. 装配前后, 构件在全局坐标系中的位置和方向是不同的, 故需要将构件的局部坐标转换为装配后的全局坐标(以下简称全局坐标). 本文首先构建装配体的配合图, 图中每个节点代表构件, 边上的属性代表构件之间的装配关系. 从具有固定约束的构件出发, 广度遍历配合图, 以确定每个构件的坐标系变换. 图 3a, 3b 表示装配体; 配合图如图 3c 所示, 以 c_{11} 为固定构件, 则 c_{11} 的坐标系为全局坐标系, 从构件 c_{11} 对应节点出发, 广度遍历配合图, 并利用边上的装配关系, 可以确定构件 c_1, c_2, \dots, c_{10} 的全局坐标; 如图 3d, 3e 所示, 利用共轴和共面约束, 确定构件 c_8 装配到 c_{11} 后的坐标系变换.

Step2. 构件一致性分类. 装配过程中, 装配单元是构件, 装配体的全局对称性由构件自身对称性和构件之间对称性确定, 构件之间的对称性仅存在于相互一致的构件之间(参见文献[19]第 2.1 节), 故本文以相互一致的构件为对称性识别单元, 相互一致的构件组成的集合称为一致构件集(congruent component set, CCS). 如图 3b, 3c 所示, 构件 c_7 与 c_8 构成一致构件集, 构件 c_1, c_2, c_3, c_4 构成一致构件集.

Step3. 一致构件集对称性识别. 以一致构件集为对称性识别单元, 充分利用装配关系、特征 CAD 模型与 B-Rep 模型对称性识别方法, 识别一致构件集对称性. 若构件中还包括子装配体, 需要递归调用本方法识别

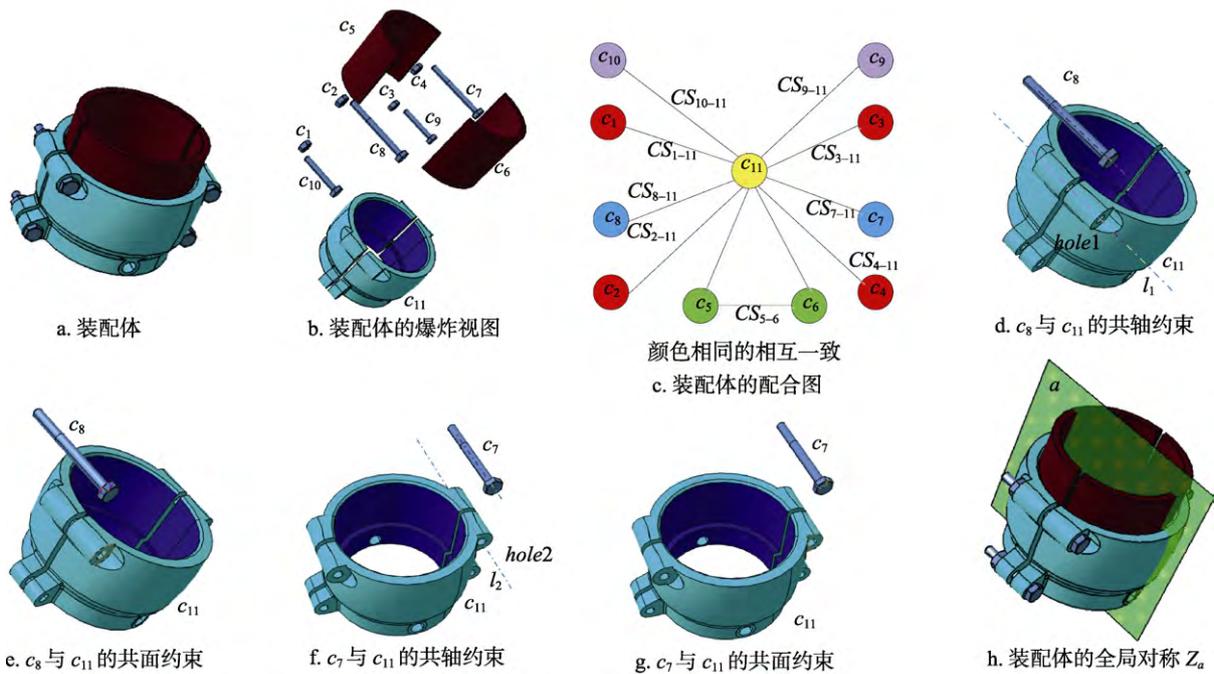


图 3 装配体的配合图与装配约束

该子装配体对称性。

Step4. 确定合并与验证次序. 根据对称性识别情况、对称数量、边数、面数等信息, 对一致构件集排序, 能提高对称性合并与验证效率。

Step5. 对称性合并与验证. 仅仅利用装配关系, 有时无法确定一致构件集对称性, 因此需要逐个合并与验证一致构件集对称性, 以确定装配体全局对称性。

3 具体方法

3.1 配合图构建与坐标变换

1) 配合图构建. 配合图用于表示装配体之间的装配关系, 配合图中的节点表示装配体层次树的第一层构件, 若存在装配关系, 则节点之间存在一条边, 边上的属性包括装配约束集和坐标系变换. 如图 3d, 3e 所示, 构件 c_8 与 c_{11} 之间的约束集包含共轴约束与共面约束, 存储在属性 CS_{8-11} 中。

2) 坐标变换. 本文利用共轴、共面、偏移等装配关系, 通过遍历配合图, 对构件局部坐标转换为全局坐标的刚体变换进行计算. 如图 3 所示, 构件 c_8 与 c_{11} 之间的约束集包含共轴约束与共面约束, 根据这 2 个约束可以确定构件 c_8 到 c_{11} 的坐标系变换. 本文假设装配体的第一层构件中有且仅有一个固定构件, 以固定构件的坐标系为全局坐标系. 某些情况下, 构件无法直接装配到固定构件上, 从而无法直接确定其坐标变换. 为了解决这个问题, 本文从配合图的固定构件出发, 广度遍历配合图,

逐步确定路径长度为 $1, 2, \dots, n$ 上构件的坐标变换. 装配后, 构件往往仍存在自由度. 如图 3d, 3e 所示, 根据 c_8 装配到 c_{11} 上后, 共轴约束和共面约束分别确定 2 个平移变换, 但此时 c_8 仍存在一个旋转自由度(旋转轴为 l_1). 本文处理对象是静态装配模型, 因此局部坐标到全局坐标的变换由这 2 个平移变换合成, 不考虑绕旋转轴 l_1 的旋转变换。

3.2 一致构件集确定

本文将一致构件集作为对称性识别单元, 原因有二: 一是能保证识别单元的对称性必定包含装配模型的对称性; 二是一致构件集要比整个装配体的范围更小, 这能保证对称识别单元的处理效率较高。

一致性识别的对象是装配体层次树的第一层构件. 如图 1 所示, 要识别装配体 a 的对称性, 仅需判定构件 c_1, c_2, \dots, c_5 的一致性. 当需要识别构件 c_5 对称性时, 再进一步判定构件 $c_{5-1}, c_{5-2}, c_{5-3}, c_{5-4}, c_{5-5}, c_{5-6}$ 的一致性(此时这 6 个构件是子装配体 c_5 的第一层构件)。

一致性判定的基本思想是: 充分利用装配体中的装配关系, 从装配级、零件级、几何级, 由粗到精地快速确定一致构件之间的一致性, 最终将装配体的构件划分为若干一致构件集. 本文采用自顶向下的方法, 故装配体构件之间的一致性判定是通过两两判定装配体第一层构件一致性实现的; 其中, 判定 2 个构件一致性是关键问题. 2 个

构件一致性判定流程如下:

Step1. 若 2 个构件分别是零件和子装配体, 则这 2 个构件必定不一致, 判定结束; 否则, 按照以下 2 种情况分别判定 2 个构件的一致性, 若 2 个构件都是装配体, 则转 Step2; 否则, 转 Step3;

Step2. 2 个构件都是子装配体:

Step2.1. 若 2 个子装配体存在复制关系(镜像或者阵列), 则这 2 个装配体一致, 判定结束; 否则, 转 Step2.2;

Step2.2. 若子装配体的构件数量、边数或面数不一致, 则 2 个子装配体不一致, 判定结束; 否则, 转 Step2.3;

Step2.3. 构建这 2 个子装配体的配合图, 若 2 个配合图的边数不一致, 则这 2 个子装配体不一致, 判定结束; 否则, 转 Step2.4;

Step2.4. 两两判定配合图的构件与另一配合图构件的一致性(转 Step1), 若找不到一致的构件, 则这 2 个子装配体不一致, 判定结束; 否则, 转 Step2.5;

Step2.5. 找出一对一致的构件, 广度遍历配合图, 判断配合图中其他构件是否一致(包含装配约束是否相同和构件是否一致), 若其他构件都相互一致, 则 2 个子装配一致, 判定结束; 否则, 2 个子装配体不一致, 判定结束.

Step3. 2 个构件都是零件:

Step3.1. 若 2 个零件存在复制关系(镜像或者阵列), 则这 2 个零件一致, 判定结束; 否则, 转 Step3.2;

Step3.2. 若 2 个零件的边数和面数不一致, 则 2 个零件不一致, 判定结束; 否则, 转 Step3.3;

Step3.3. 若 2 个零件都是特征 CAD 模型, 则利用文献[19]方法判定一致性, 判定结束; 否则, 转 Step3.4;

Step3.4. 利用文献[17]中的方法, 判定 B-Rep 模型一致性, 判定结束.

3.3 一致构件集对称性识别

3.3.1 基本思想

本文采用文献[19]中的记号, 假设一致构件集 $CCS = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$, 每个构件 c_i 的自身对称集为 $S_{Self}(c_i)$, 一致构件集 CCS 中, 构件之间的对称集为 $S_{inter}(CCS)$, 根据文献[19]第 2.1, 4.3 节中的结论, 有

$$S(CCS) = (S_{Self}(c_1) \cup^S S_{Self}(c_2) \cup^S \dots \cup^S S_{Self}(c_n)) \cup^S S_{inter}(CCS) \quad (1)$$

其中, \cup^S 表示 2 个对称集的合并(参见文献[19]的式(1)(2)). 一致构件集对称性识别总体流程如下: 先利用文献[17,19]方法识别构件自身对称性(当构件是子装配体时, 递归调用本文方法识别其自身对称性);

然后利用构件自身对称性和装配关系, 计算(部分) $S_{inter}(CCS)$; 最后利用式(1)计算一致构件集的部分对称集. 一致构件集对称性识别关键在于, 如何充分利用装配关系计算构件之间的对称性 $S_{inter}(CCS)$, 这是本文的工作重点.

3.3.2 构件间对称性识别

装配关系主要包含装配约束和装配特征. 其中, 装配约束主要包含共轴约束、共面约束、同心约束、偏移约束; 装配特征主要包含镜像特征与阵列特征, 阵列特征包含圆形阵列和矩形阵列. 利用装配特征识别构件之间的对称性, 与利用零件镜像特征与零件阵列特征识别特征间对称性类似(参见文献[19]第 4.3.2 节 Case3). 利用单个装配约束或者多个装配约束组合, 可以直接确定构件间的对称性, 分别讨论如下:

单约束. 利用共轴、同心或偏移约束, 并结合构件自身对称性和几何信息, 通过几何推理, 能确定构件间对称性. 如图 4a 所示, 若 2 个一致圆台 c_1 与 c_2 之间存在共轴(轴线 a)约束, 则可以确定 2 个构件之间的对称 Z_b 和 $R_{d,2}$. 假设 2 个圆台平行面 f_1 与 f_2 之间距离为 e , 则将 f_1 沿着外法向平移 $e/2$ 距离得到反射对称面 b , 点 d 是面 b 与轴线 a 的交点, $R_{d,2}$ 表示以面 b 内穿过点 d 的直线为旋转轴、阶数为 2 的旋转对称; 如图 4b 所示, 2 个一致圆台的面 f 同心, 此时能确定的构件之间对称是 Z_b 和 $R_{d,2}$; 如图 4c 所示, 2 个一致的圆台轴线之间存在偏移约束. 假设偏移距离是 f , 若 2 个圆台的顶面 f_1 与 f_2 共面, 则可以确定 2 个圆台之间的旋转对称 $R_{e,2}$, 轴线 e 位于轴 a 和轴 b 确定的平面中, 且与轴 a 、轴 b 都平行, 与轴 a 、轴 b 的距离都是 $f/2$. 在实际工程应用中, 利用单个装配约束直接确定构件对称性的情况比较少见.

多约束. 装配构件时, 构件的装配约束往往不止一个, 共轴和共面是一种常见的约束组合. 如图 4d

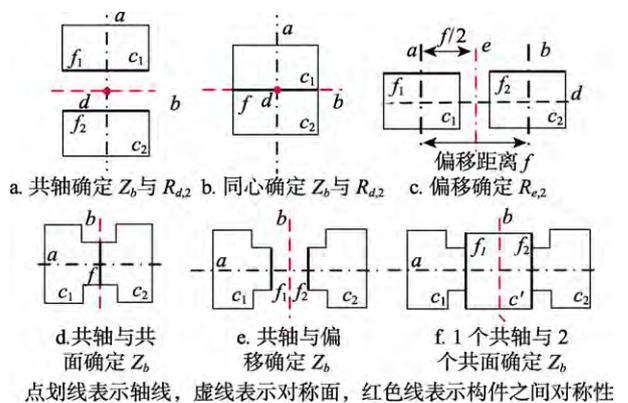


图 4 利用装配约束确定构件间对称性

所示, 2 个一致构件间存在共轴约束, 且 2 个构件的一致面 f 重合, 则可以确定 2 个构件之间的对称 Z_b ; 如图 4e 所示, 2 个一致构件间存在共轴约束, 且 2 个构件的一致面 f 存在偏移约束, 沿着偏移方向的偏移距离一半处, 存在一个与轴线 a 垂直的反射对称性面 b ; 用螺栓和螺帽装配构件时, 常用图 3d~3g 所示的方式定义装配约束, 其简化表示如图 4f 所示, 构件 c_1 与 c_2 分别与另一个构件 c' 共面且同轴, 若面 f_1 与 f_2 关于面 b 对称, 则可以确定构件 c_1 与 c_2 之间的反射对称 Z_b . 因此, 可以判定图 3 中构件 c_8 与 c_7 关于面 a 反射对称, 构件 c_9 与 c_{10} 关于面 a 反射对称. 类似地, 可以确定图 3 中 4 个螺帽 c_1, c_2, c_3 与 c_4 之间的反射对称 Z_a .

利用约束识别构件之间对称性说明如下:

1) 装配约束确定的不属于构件之间的对称性. 按照文献[19]中定义, 图 4a 中的旋转对称性(轴 a), 虽然可以通过共轴约束确定, 但不属于构件 c_1 与 c_2 之间的对称性. 这种对称性, 可以通过合并构件 c_1 和 c_2 的自身对称性得到. 图 4b~4f 中不属于构件之间的对称性, 同样可以通过合并构件自身对称性得到;

2) 需要其他一致构件集对称性信息. 在识别构件间对称性时, 有时需要先识别其他一致构件集对称性. 如图 4f, 需要判别面 f_1 与 f_2 之间是否关于面 b 对称, 可以先识别构件 c' 的自身对称性;

3) 利用装配约束有时无法完全确定构件之间的对称性. 对称构件的装配约束有时不同, 这导致仅利用装配约束会遗漏构件之间的对称性, 本文仅定义了比较常见的构件间对称性识别规则, 这些规则并不包含装配约束的所有情况. 因此, 本文对一致构件集对称性识别, 分别标记为完全识别、部分识别和完全未识别 3 种情况.

3.4 对称性的合并与验证

本文根据文献[19]中的对称性合并与验证结论, 对所有一致构件集对称性逐步合并与验证, 最终确定装配体的全局对称性. 为提高对称性合并与验证效率, 本文先对一致构件集排序, 然后按序合并与验证对称性. 对于已知的对称性进行对称性合并, 对于未知对称性进行对称性验证.

3.4.1 合并与验证次序确定

一致构件集排序结果如图 5 所示, 具体规则如下:

规则 1. 对称性完全已知的优先于对称性部分未知的, 对称性部分未知的优先于对称性完全未知的.

规则 2. 对称性部分已知的构件集中面数少的优先于面数多的.

规则 3. 对称性未知的构件集中面数少的优先于面数多的.

规则 1 排序的原因在于, 对称性合并比对称性验证效率高; 规则 2, 3 排序的原因在于, 对称性部分已知和对称性完全未知时, 需要验证对称性, 面数越少则验证效率越高.



图 5 一致构件集排序

3.4.2 合并与验证过程

定义当前中间模型和当前一致构件集.

假设装配体共有 n 个一致构件集 $CCS_1, CCS_2, \dots, CCS_n$, 排序后的序列为 $CCS_1 \rightarrow CCS_2 \rightarrow \dots \rightarrow CCS_n$. 当前中间模型是指有序序列中第 1, 2, ..., i 个一致构件集构成的子装配模型; 当前一致构件集是指第 $i+1$ 个一致构件集, $i = 1, 2, \dots, n-1$.

对称性合并与验证的具体流程如下: 依据第 3.4.1 节确定的合并与验证次序, 将第 1 个一致构件集作为当前中间模型, 第 2 个作为当前一致构件集, 合并或验证两者的对称性, 将第 1 个和第 2 个一致构件集构成的装配模型作为当前中间模型, 第 3 个一致构件集作为当前一致构件集, 合并或验证两者的对称性, 以此类推, 直到将 1, 2, ..., $n-1$ 个一致构件集作为当前中间模型, 第 n 个一致构件集作为当前一致构件集, 合并或验证两者对称性的结果, 就是整个静态装配模型的全局对称性. 在此过程中, 若合并或验证的结果为空, 则程序终止并输出“无全局对称性”.

对称性合并与验证过程中, 分 2 种情况:

情况 1. 若当前一致构件集对称性已知, 利用文献[19]第 2.2 节中 Approach1 方法, 确定由当前中间模型与当前一致构件集构成的装配模型对称性;

情况 2. 若当前一致构件集对称性部分已知或未知, 利用文献[19]第 2.2 节中 Approach2 方法, 计算当前中间模型与当前一致构件集构成的装配模型对称性.

当一致构件集中的对称性部分识别或者完全未识别时, 需要进行对称性验证, 这需要对一致构件集采样. 为了降低采样密度, 本文利用四点验与特征点验证相结合的验证方法, 用以提高验证效率, 具体讨论如下:

1) 四点验证. 若一致构件集中的构件形心都不在待验证的对称轴或对称面上, 则采用四点验证策略. 即提取其中一个构件的不共面的 4 个点, 根据构件之间的一致性关系提取其他构件上与这 4 个点存在一致性关系的 4 个对应点, 这样构成

4 个点集, 然后分别验证这 4 个点集对称性. 选择四点验证的原因有二: 一是此时要验证构件之间的对称性, 要确定三维形状的空间位姿, 至少定该三维形状上 4 个不共面的采样点; 二是一致构件集中的构件相互一致, 因此仅在构件的局部坐标系内, 构件上相同几何采样点必定存在一致关系;

2) 特征点验证. 若一致构件集中的构件形心都在待验证的对称轴或对称面上, 则采用特征点验证策略. 即提取构件的特征点, 然后验证每个构件特征点的对称性. 特征点选择参考文献[17]方法, 如直线选择其 2 个端点, 圆弧选择两个端点和圆弧中点等. 选择特征点验证的原因有二: 一是此时要验证构件内部的对称性, 特征点是代表构件形状的重要特征, 能够完全确定构件的空间位姿; 二是相对于构件的密集采样点(如等距采样), 特征点的规模要小得多.

对称性合并与验证过程中, 需要将对称面与对称轴的局部坐标转换为全局坐标; 验证过程中, 无论是四点验证策略还是特征点验证策略, 局部坐标系中的采样点也需要转换为全局坐标系中的采样点. 局部坐标系到全局坐标系转换方法详见第 3.1 节.

4 实验

下面通过 2 个实验来测试本文方法的正确性和效率. 本文使用 CATIA 上的 CAA RADE R21 二次开发库, 开发语言是 C++; 硬件平台采用 3.6 GHz i7 4790 CPU 和 8 GB 内存.

4.1 实验 1

实验 1 对图 1 的装配体 *a* 进行对称性识别, 该装配体包含 5 个构件 c_1, c_2, c_3, c_4, c_5 . 各阶段实验结果如表 1 和图 6 所示. 首先构建装配体 *a* 的配合图, 如图 6a 所示, 图中 CS_{i-j} 代表构件 c_i 和 c_j 之间的装配关系; c_3 为固定构件, 从 c_3 出发, 广度遍历配合图, 利用装配关系获取每个构件的坐标系变换, 以确定各构件的全局坐标; 然后根据第 3.2 节的步骤确定一致构件集, 一致构件集判别结果如表 1 所示. 一致构件集对称性识别部分结果如图 6b~6d 所示. 利用第 3.4.1 节规则对一致构件集进行排序, 排序结果如表 1 所示; 最后根据此顺序利用第 3.4.2 节的方法合并与验证对称性, 合并与验证过程如表 1 所示, 装配体 *a* 的全局对称识别结果如图 6e 所示.

表 1 实验 1 各阶段结果

程序执行阶段	详细情况		
一致构件集判别	$CCS_1=\{c_1, c_2\}, CCS_2=\{c_3\}, CCS_3=\{c_4\}, CCS_4=\{c_5\}$		
一致构件集对称性识别	$S(CCS_1)=\{\emptyset\}$ (未知), $S(CCS_2)=\{Z_b\}, S(CCS_3)=\{Z_b\}, S(CCS_4)=\{Z_b\}$		
根据配合图确定合并与验证次序	CCS_2	CCS_3	CCS_4
合并与验证对称性	当前中间模型	当前一致构件集	对称性合并与验证结果
	CCS_2	CCS_3	$S(CCS_2 \cup CCS_3)=\{Z_b\}$
	$CCS_2 \cup CCS_3$	CCS_4	$S(CCS_2 \cup CCS_3 \cup CCS_4)=\{Z_b\}$
	$CCS_2 \cup CCS_3 \cup CCS_4$	CCS_1	$S(CCS_2 \cup CCS_3 \cup CCS_4 \cup CCS_1)=\{Z_b\}$
最后结果	装配体 <i>a</i> 的全局对称为 $\{Z_b\}$		

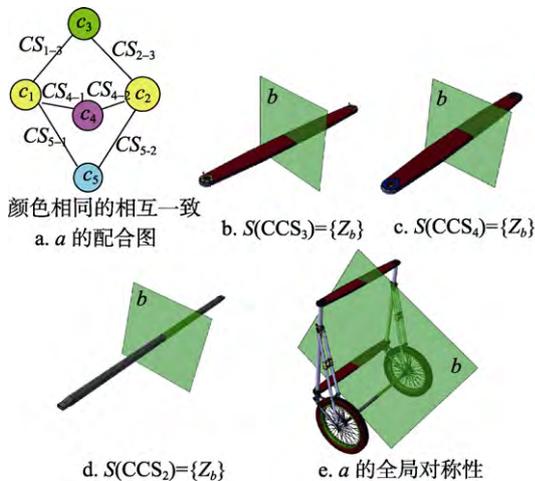


图 6 一致构件集对称性识别

4.2 实验 2

在实验 2 中, 采用本文方法识别了图 7 中的 6 个装配体对称性, 图中左边表示原始模型, 右边表示

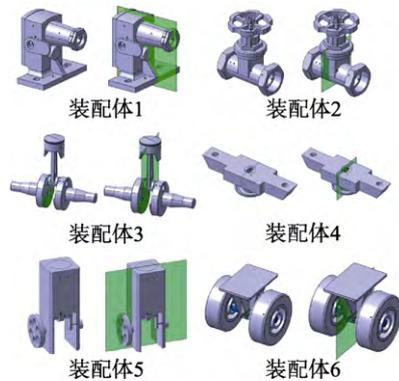


图 7 实验 2 全局对称性识别实验结果

对称性识别结果. 实验表明, 本文方法能正确快速地识别这些静态装配体的对称性.

静态装配模型的详细对称识别结果如表 2 所示, 其中, N_{CCS} 表示一致构件集的数量, RT 表示程序运行的时间(running time, RT). 实验结论如下: 1) 对称性识别结果正确; 2) 对于这些装配体, 识别时间不超过 2 s.

表 2 实验 2 实验结果统计

序号	模型名称	N_{CCS}	RT/s
1	旋转齿轮泵	4	0.657
2	水阀	8	0.666
3	活塞连杆	3	0.933
4	按钮注塑模具构件	2	0.795
5	内燃机机构	4	1.112
6	半挂车拖板轮子	4	1.758

5 总结和未来工作

本文提出了一种装配体全局对称性识别方法, 以一致构件集为对称性识别单元, 充分利用装配体中的装配关系, 识别装配体的全局对称性. 本文创新点具体如下:

1) 装配体通过装配关系将构件装配而成, 是一种层次化表示结构. 针对这种特点, 本文扩展了基于特征的零件 CAD 模型的对称性识别方法^[19], 提出了一种自顶向下、基于“分治法”的装配体全局对称性识别框架;

2) 充分利用装配约束, 结合构件的几何信息, 通过几何推理, 识别构件间对称性;

本文未来工作方向有 2 个方面: 1) 识别可动装配模型在运动过程中的全局对称性; 2) 装配模型中细节特征往往导致装配模型不精确对称. 因此, 下一步考虑识别装配模型中的不精确对称性.

参考文献(References):

- [1] Shahwan A, Léon J C, Foucault G, *et al.* Qualitative behavioral reasoning from components' interfaces to components' functions for DMU adaption to FE analyses[J]. *Computer-Aided Design*, 2013, 45(2): 383-394
- [2] Suresh K, Sirpotdar A. Automated symmetry exploitation in engineering analysis[J]. *Engineering with Computers*, 2006, 21(4): 304-311
- [3] Highnam P T. Optimal algorithms for finding the symmetries of a planar point set[J]. *Information Processing Letters*, 1986, 22(5): 219-222
- [4] Atallah M J. On symmetry detection[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 1985, 34(7): 663-666
- [5] Wolter J D, Woo T C, Volz R A. Optimal algorithms for symmetry detection in two and three dimensions[J]. *The Visual Computer*, 1985, 1(1): 37-48
- [6] Jiang X Y, Bunke H. A simple and efficient algorithm for determining the symmetries of polyhedra[J]. *CVGIP: Graphical Models and Image Processing*, 1992, 54(1): 91-95
- [7] Jiang X Y, Yu K R, Bunke H. Detection of rotational and involutory symmetries and congruity of polyhedra[J]. *The Visual Computer*, 1996, 12(4): 193-201
- [8] Mitra N J, Guibas L J, Pauly M. Partial and approximate symmetry detection for 3D geometry[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2006, 25(3): 560-568
- [9] Pauly M, Mitra N J, Wallner J, *et al.* Discovering structural regularity in 3D geometry[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(3): Article No.43
- [10] Sun C M, Sherrah J. 3D symmetry detection using the extended Gaussian image[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 1997, 19(2): 164-168
- [11] Kazhdan M, Funkhouser T, Rusinkiewicz S. Symmetry descriptors and 3D shape matching[C] // *Proceedings of the Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Geometry Processing*. New York: ACM Press, 2004: 115-123
- [12] Martinet A, Soler C, Holzschuch N, *et al.* Accurate detection of symmetries in 3D shapes[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2006, 25(2): 439-464
- [13] Gelfand N, Guibas L J. Shape segmentation using local slippage analysis[C] // *Proceedings of the Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Geometry Processing*. New York: ACM Press, 2004: 214-223
- [14] Lipman Y, Chen X B, Daubechies I, *et al.* Symmetry factored embedding and distance[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2010, 29(4): Article No.103
- [15] Tate S J, Jared G E M. Recognising symmetry in solid models[J]. *Computer-Aided Design*, 2003, 35(7): 673-692
- [16] Li K, Foucault G, Léon J C, *et al.* Fast global and partial reflective symmetry analyses using boundary surfaces of mechanical components[J]. *Computer-Aided Design*, 2014, 53(5): 70-89
- [17] Li M, Langbein F C, Martin R R. Detecting design intent in approximate CAD models using symmetry[J]. *Computer-Aided Design*, 2010, 42(3): 183-201
- [18] Jiang Junfeng, Chen Zhengming, He Kunjin. An approach to rapidly detect the global symmetries in feature-based CAD models[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2013, 25(9): 1416-1426(in Chinese)
(蒋俊锋, 陈正鸣, 何坤金. 特征 CAD 模型的全局对称的快速识别方法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2013, 25(9): 1416-1426)
- [19] Jiang J F, Chen Z M, He K J. A feature-based method of rapidly detecting global exact symmetries in CAD models[J]. *Computer-Aided Design*, 2013, 45(8/9): 1081-1094
- [20] Bourjault A. Contribution a une approche methodologique de l'assemblage automatique: Elaboration automatique des sequences operatoires[D]. Besancon: Universite de Franche-Comte, 1984(in France)
- [21] Cho D Y, Shinf C K, Chot H S. Automatic inference on stable robotic assembly sequences based upon the evaluation of base assembly motion instability[J]. *Robotica*, 1993, 11(4): 351-362
- [22] Ou L M, Xu X. Relationship matrix based automatic assembly sequence generation from a CAD model[J]. *Computer-Aided Design*, 2013, 45(7): 1053-1067
- [23] Zhang J, Xu Z J, Li Y, *et al.* Generic face adjacency graph for automatic common design structure discovery in assembly models[J]. *Computer-Aided Design*, 2013, 45(8/9): 1138-1151