

基于子图同构与事例匹配的装配体局部结构相似性分析

周 炜, 郑建荣, 颜建军

(华东理工大学机械与动力工程学院 上海 200237)

(wzhou@ecust.edu.cn)

摘 要: 基于事例推理是解决面向装配的设计和装配工艺规划问题的有效方法, 装配体检索是应用此方法的关键步骤. 为此提出一种基于子图同构与事例匹配的装配体局部结构相似性分析方法, 该方法将装配体零件间的装配关系用属性邻接图来表示, 通过对装配体中联结关系的定性分类及装配体属性邻接图预处理规则的定义, 利用 Ullmann 算法匹配出相似的装配体图(子图)结构, 并给出了装配体局部结构相似度计算公式. 最后通过实验验证了文中方法的有效性.

关键词: 装配体模型; 事例匹配; 子图同构; 相似计算

中图分类号: TP391

Local Matching of Assemblies Based on Subgraph Isomorphism and Case Matching

Zhou Wei, Zheng Jianrong, and Yan Jianjun

(College of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237)

Abstract: Case based reasoning is an effective method to solve design for assembly and assembly planning problems, while assemblies retrieval and indexing is a primary step to its application. A method of local matching of assembly models is proposed, which is based on subgraph isomorphism and case matching. An attributed adjacency graph is constructed to represent assembly models. The connection relations of assemblies are formally expressed and categorized. The pretreatment rules of the attributed adjacency graph of assemblies are defined. Then, the similar structures of assembly graph(subgraph) are matched by using Ullmann algorithm. And similarity calculation formulae of local matching of assemblies are given. Finally, an example is illustrated to verify the validity of the proposed approach.

Key words: assembly model; case matching; subgraph isomorphism; similarity calculation

基于面向装配的设计 (design for assembly, DFA) 理论的装配再设计和装配工艺规划都是 NP 完备性问题, 很难找到确定性的求解算法. 基于事例推理 (case base reasoning, CBR) 是通过访问数据库中过去同类问题的求解而获得当前问题解的一种推理模式^[1]. CBR 是解决 DFA 和装配工艺规划问题的有效方法, 装配体检索是应用此方法的关键步骤.

张旭堂等^[2]提出了基于二分图理论的装配体相似计算模型, 对联结关系进行定量分析. 该方法侧重于联结关系的相似度匹配, 匹配出的结果往往是库

中多个事例联结关系的组合, 对事例复用的智能化程度比较低. 苏强等^[3]提出了 CBR 的装配顺序规划中的遗传算法, 将事例中相同零件类型码个数与相同位置上装配关系码个数的乘积定义为适应度函数. 该方法需预定义零件类型, 不易识别出装配关系类似而零件类型码不同的装配体. Dong 等^[4]建立了基于联接件知识的装配事例库, 在规划过程中运用了联接件知识. Seo 等^[5]提出了基于案例推理的造船部件装置的装配规划, 该方法需预先对零件类型及零件间的操作关系进行定义.

本文提出了一种基于子图同构与事例匹配的装配体局部结构相似性分析方法,将装配体中零件及零件间的装配关系用图结构来表示,清晰地表示了装配体中各零件的装配关系,无需定义详细的零件类型.在子图同构与事例匹配的基础上,本文方法能较好地匹配出相近装配体局部结构,提高事例检索的智能化程度.

1 装配体局部匹配的总思路

直接给定任意 2 个三维 CAD 装配体模型,完全自动识别出两者相似性是困难的,目前还没有很好的解决方法.在设计过程中,设计人员往往对装配体中的某些局部结构非常关注,希望能在已有产品模型中找到具备该局部结构的装配体.装配体特征主要体现在其零部件间的配合及联结方法上,这也是影响装配工艺的主要因素.本文将装配体看作是零件及零件间装配关系的集合,将一个装配体等价转换成一个属性邻接图来表示,顶点代表装配体中的各零件,边代表零件间的装配关系.

CBR 是 20 世纪 80 年代初期提出的一种人工智能技术,其实质是根据问题描述,从事例库中提取相似事例,并通过事例的参考得到问题的解^[6].利用 CBR 技术求解问题的基本思路一般分为 3 个步骤:事例库建模、相似事例搜索及 CBR 推理.本文重点对装配事例的表示及相似事例搜索等内容进行研究.装配体局部结构匹配方法建立在图、子图匹配、相似性计算及相似事例提取的基础之上,其总思路如图 1 所示.

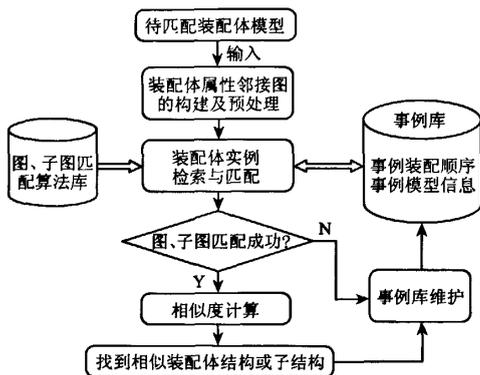


图 1 本文系统总思路

首先将待匹配模型用属性邻接图 (attributed adjacency graph, AAG) 来表示,并对该 AAG 进行

预处理.将其与事例库中的 AAG 进行图、子图匹配,若图、子图匹配成功,则进行相似度计算,并将相似度合理的事例作为最终匹配事例.系统运行过程中事例库的修改和维护工作是依靠事例库维护模块进行的,以保证其合理性.

2 装配体局部结构相似性分析的关键技术

2.1 基于 AAG 的装配体表示

AAG^[7]是基于图论的特征识别方法的基础,可描述为 $AAG = G(V, E, A)$,其中, V 代表图中顶点的集合, E 代表连接顶点的边, A 代表边的凸凹属性.

本文将 AAG 应用在装配体的表示上,装配体零件属性邻接图的数据结构定义为 (V, E, A_V, A_E) .其中, V 为图中顶点的集合, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_n\}$, v_i 表示装配体第 i 个零件 (P_i); E 为图中边(或弧)的集合, $E = \{e_1, e_2, \dots, e_i, \dots, e_m\}$, e_i 代表连接 v_i 和 v_j 2 个顶点的边,即零件 P_i 和零件 P_j 的装配关系; $A_V(v_i)$ 代表第 i 个顶点的属性, $A_E(e_i)$ 代表第 i 条边的属性.分别定义如下:

$A_V(v_i)$ 用于表示顶点的属性,其数据结构如下:

```

Class Node
{
    NodeNumber // 顶点编号
    PartMergeMarker // 零件合并标志位
    PartNum // 零件个数
    PartMerge * // 用于对合并顶点的存储
}
    
```

顶点编号用于图顶点的管理;零件合并标志位用于顶点合并的标识;零件个数代表该顶点合并的零件个数.

$A_E(e_i)$ 用于表示第 i 条边属性.用一个 8 位的二进制数值来表示零部件之间的联结关系和配合信息,定义为装配关系码,记为 AC_i .根据常见的装配语义与联结关系的配合形式^[2,8],装配关系码的定义如表 1 所示.表 1 中的 $b_k (0 \leq k \leq 7)$ 是一个二进制位,即 0 或 1;若对应位为 1,说明存在对应的装配关系.为方便起见,程序中将此 8 位二进制数用 2 位十六进制数来表示.

表 1 装配关系码

关系码	装配关系							
	轴孔配合	螺纹、销连接	键槽配合	面贴合	对齐	齿轮啮合	带、链传动	螺旋传动
	b_7	b_6	b_5	b_4	b_3	b_2	b_1	b_0

2.2 装配体 AAG 的预处理

装配体是由多个零件所组成的,即便是功能相同的部件或子装配体,由于它们在结构上存在差别也使得其所包含的零件数目不尽相同.装配体 AAG 的预处理可简化装配体图结构,并对装配体中部分零件进行归并,为子图匹配奠定基础.本文定义规则如下:

规则 1. 在装配体 AAG 中,若顶点 A 与顶点 B 在图结构中与其他顶点具有相同的联结方式及相同的边属性,即顶点 A 与顶点 B 的位置可以互换,则顶点 A 与顶点 B 可合并.合并后重新设置顶点属性.

规则 2. 在装配体 AAG 中,若与顶点 A 相连的所有顶点(顶点 B 除外)均与顶点 B 相连,且对应边中,与顶点 A 相连的装配码为 1 的位在与顶点 B 相连的装配码对应位上也为 1,即对应边上与顶点 A 的装配关系是与顶点 B 的装配关系的子集,则顶点 A 可合并到顶点 B.合并后重新设置顶点属性.

规则 3. 在装配体 AAG 中,若顶点 A 的度小于 2,且顶点 A 与顶点 B 相连,则顶点 A 可合并到顶点 B.

规则 1 用于合并装配体结构中完成相同功能并与其他零件具有相同装配关系的零件,规则 2 用于合并某些共同完成某种装配功能的零件,规则 3 用于合并图结构中的行星顶点.

2.3 装配体局部结构及装配关系的相似度

1) 装配关系的相似度

装配体中零部件形式多种多样,联结关系也不尽相同.联结关系属性分为定量和定性的 2 种,本文从定性角度分析装配关系的相似度.根据表 1 中的装配关系码,本文定义装配关系相似度

$$\text{sim}E_i(f_p^A, f_q^B) = \frac{\text{Sum}(AC_{pA} \cap AC_{qB})}{\text{Sum}(AC_{pA} \cup AC_{qB})} \quad (1)$$

其中, $\text{sim}E_i(f_p^A, f_q^B)$ 为装配体 A 第 p 条边与装配体 B 第 q 条边的装配关系的相似度, i 为匹配案例装配关系的编号; AC_{pA} 为装配体 A 第 p 条边的装配关系码, AC_{qB} 为装配体 B 第 q 条边的装配关系码; $\text{Sum}()$ 函数是对括号中的二进制数位为 1 的个数进行计数.

2) 装配体局部结构的相似度

本文中的装配体局部结构相似性分析是建立在图(子图)同构基础上的,它是用来计算 2 个装配体相似度的前提条件.装配体 A 和装配体 B 局部结构相似度

$$LS_{AB} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \times \text{sim}E_i(f_p^A, f_q^B)}{\sum_{i=1}^n w_i} \times \frac{2 \times n}{N_A + N_B},$$

$$p \in N_A, q \in N_B;$$

其中, n 为匹配成功子图边的数量, w_i 是匹配成功第 i 条边的权值,定义 $w_i = 1/n$; N_A 为装配体 A AAG 预处理后边的个数, N_B 为装配体 B AAG 预处理后边的个数.

2.4 图、子图匹配算法

下面首先给出图论中的相关概念^[9]:

定义 1. 图同构. 设 $G_1 = \langle V_1, E_1 \rangle, G_2 = \langle V_2, E_2 \rangle$ 为 2 个无向图(2 个有向图),若存在双射函数 $f: V_1 \rightarrow V_2$, 对于 $v_i, v_j \in V_1, (v_i, v_j) \in E_1 \langle (v_i, v_j) \in E_1 \rangle$, 当且仅当 $(f(v_i), f(v_j)) \in E_2 \langle (f(v_i), f(v_j)) \in E_2 \rangle$, 并且 $(v_i, v_j) \langle (v_i, v_j) \rangle$ 与 $(f(v_i), f(v_j)) \langle (f(v_i), f(v_j)) \rangle$ 的重数相同, 则称 G_1 与 G_2 是同构的.

定义 2. 子图同构. 给定标号图 G_1 与 G_2 , 若 G_1 中存在子图 G 与图 G_2 同构, 则称 G_1 与 G_2 是子图同构的.

若装配体 A 的图结构与装配体 B 的图结构存在子图同构的关系, 则认为图、子图匹配成功; 否则, 认为匹配失败. 本文中图、子图匹配采用 Ullmann 算法^[10]. Ullmann 算法是利用顶点的邻接关系来寻找同构子图, 该算法以深度优先的方式进行搜索, 匹配过程记录在一个布尔矩阵中, 当顶点不匹配时则回溯到最近匹配的顶点, 寻找其他的搜索方向. 同时, 该算法检查匹配点对的邻接点情况, 以尽可能早地识别出不匹配点, 提高了算法的效率.

3 本文方法步骤

基于子图同构与事例匹配的装配体局部结构相似性分析方法步骤如下:

Step1. 输入待匹配装配体, 建立装配体 AAG.

Step2. 利用装配体图结构预处理规则库知识对装配体 AAG 进行预处理.

Step3. 令 $k=1$.

Step4. 取事例库中的第 k 个事例, 并利用 Ullmann 算法进行图、子图匹配.

Step5. 若匹配不成功, 转 Step8.

Step6. 对第 k 个事例中图、子图匹配成功的各种方案分别计算装配体局部结构相似度 LS_{K_i} .

Step7. 取 LS_{K_i} 中的最大值作为第 k 个事例装配体局部结构最大相似度值, 记为 $LS_{K_{\text{Max}}}$; 记录 $LS_{K_{\text{Max}}}$ 及对应顶点.

Step8. $k=k+1$.

Step9. 若 $k < n$, 转入 Step4.

Step10. 选取事例库中所有相似事例中相似度最大的事例作为最终匹配事例. 若库中存在相似度相同的事例, 则取子图的边数量 n 较大者.

Step11. 若找到最终匹配事例, 记录最终匹配事例的最大相似度 LS_{Max} 及对应顶点. 事例库维护模块完成事例库的修改和维护工作, 以保证其合理性.

4 实 例

图 2 所示为部分轴承及机座的局部装配图; 图 3 所示为图 2 装配体对应的 AAG, 其中, 顶点标号为

配关系码; 图 4 所示为图 3 装配体 AAG 预处理后的图表示, 图中序号为边的编号. 图 4 a 中的顶点 A'_6 为图 3 a 中的 A_6 合并到 A_5 后的顶点, 图 4 c 中的顶点 C'_5 为图 3 c 中的 C_4 合并到 C_5 后的顶点, 图 4 d 中的顶点 D'_5 为图 3 d 中的 D_6 合并到 D_5 后的顶点, 图 4 e 中的顶点 E'_4 为图 3 e 中的 E_5, E_6 合并到 E_4 后的顶点.

将图 4 中装配体 A 和 E 作为库中事例, B, C 和 D 作为待匹配装配体, 使用本文方法进行装配局部结构体相似性匹配; B 分别与 A 和 E 子图匹配成功,

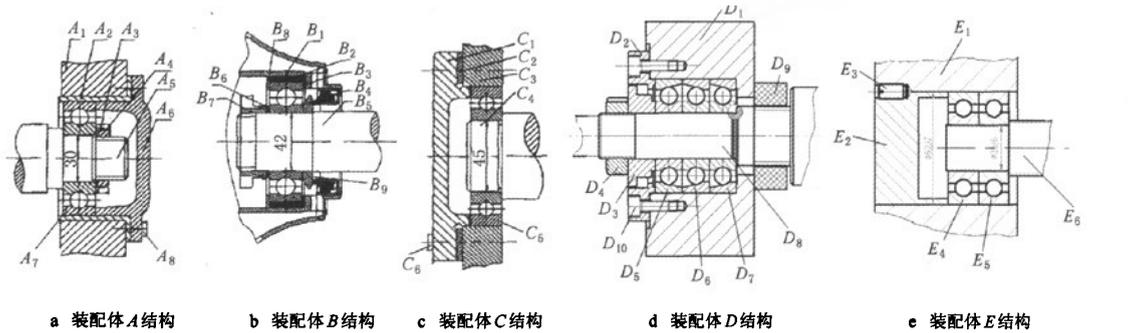


图 2 实例

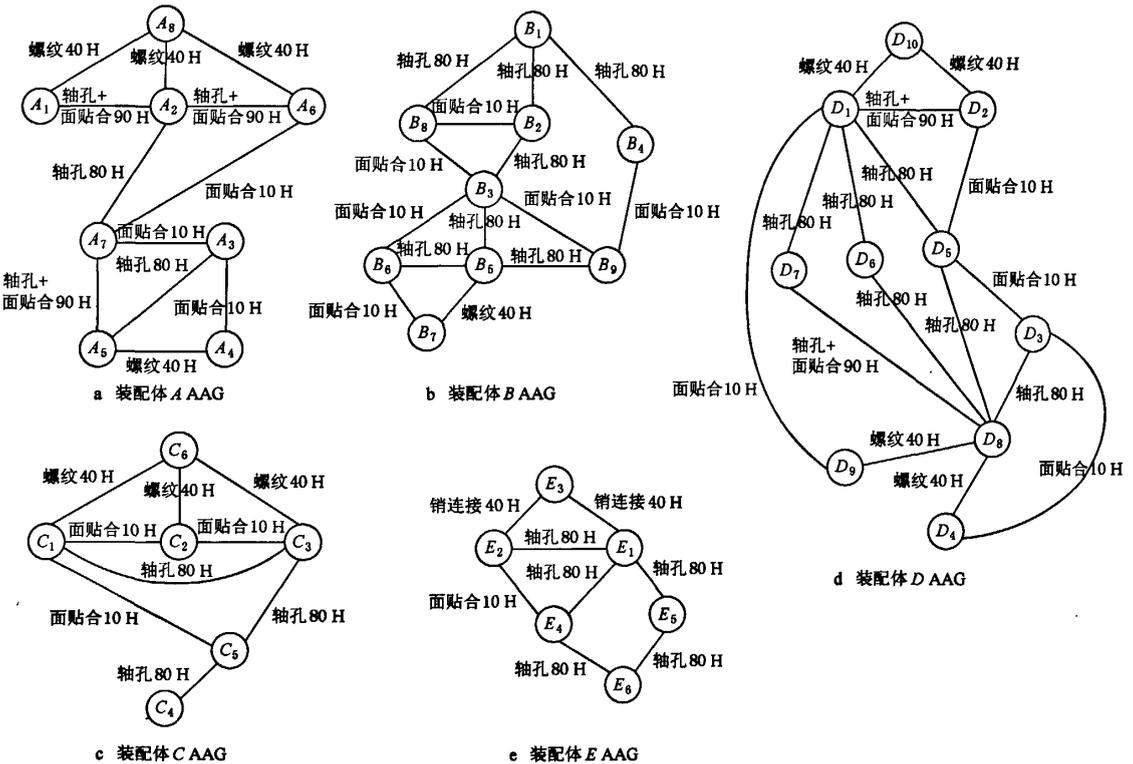


图 3 实例的 AAG

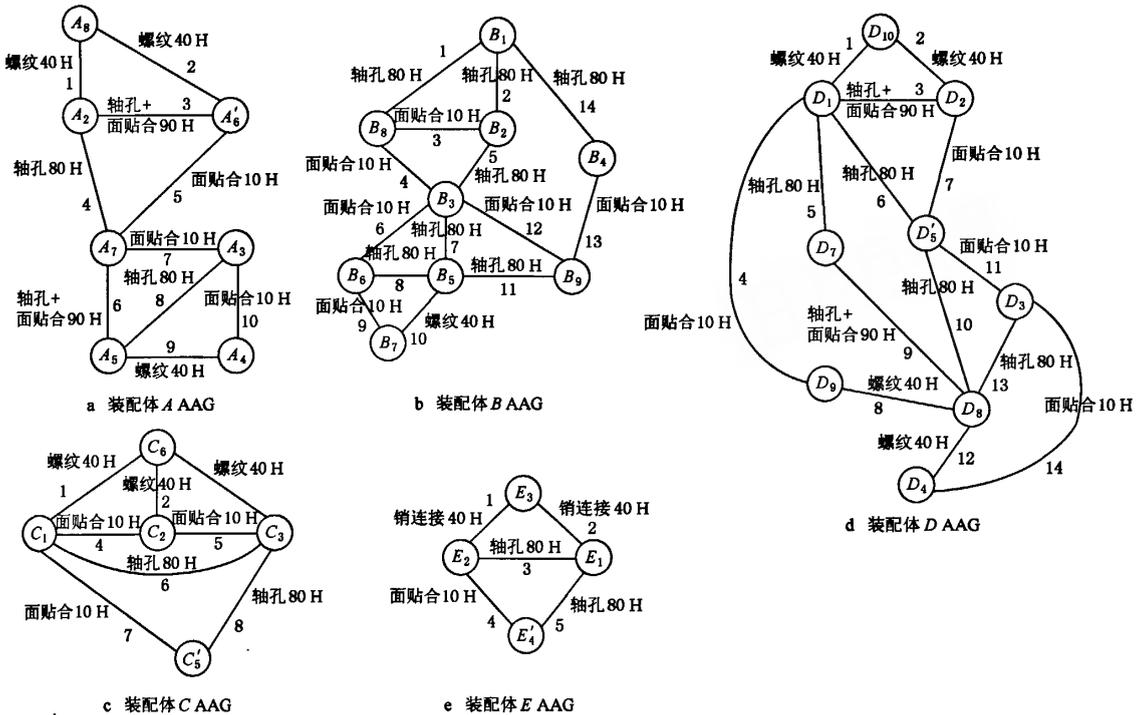


图 4 顶点处理后的实例的 AAG

D 分别与 A 和 E 子图匹配成功, C 和 E 子图匹配成功. 根据相似度取最大值的原则, D 的相似事例为 A, C 的相似事例为 E. 在 B, A 事例匹配中, 子图匹配成功的方案有 8 种, 各种方案中对应顶点、对应边装配关系的相似度及各方案的局部结构相似度如表 2 所示, 其中 $n=10, N_A=10, N_B=14, w_i=0.1$.

由表 2 可以看出, 第 4 种方案所计算的局部结构相似度最大, 故将方案 4 作为 B, A 最终匹配成功事例, 并记录对应顶点. B 和 E, C 和 A, C 和 E, D 和 A, D 和 E 事例的计算过程与 B 和 A 事例相类似, 匹配结果及相关数据如表 3 所示.

表 2 装配体 A, B 事例的相似度计算数据

方案	对应顶点	对应边装配关系的相似度	$LS_{D(A)} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \times simE_i(f_A^i, f_B^i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \times \frac{2 \times n}{N_A + N_B}$
1	A ₈ 与 B ₁ , A ₂ 与 B ₈ , A ₆ ' 与 B ₂ , A ₇ 与 B ₃ , A ₅ 与 B ₆ , A ₃ 与 B ₅ , A ₄ 与 B ₇	$simE_1(f_1^a, f_1^b) = 0$	$simE_2(f_2^a, f_2^b) = 0$
		$simE_3(f_3^a, f_3^b) = 0.5$	$simE_4(f_4^a, f_4^b) = 0$
		$simE_5(f_5^a, f_5^b) = 0$	$simE_6(f_6^a, f_6^b) = 0.5$
		$simE_7(f_7^a, f_7^b) = 0$	$simE_8(f_8^a, f_8^b) = 1$
		$simE_9(f_9^a, f_9^b) = 0$	$simE_{10}(f_{10}^a, f_{10}^b) = 0$
2	A ₈ 与 B ₁ , A ₂ 与 B ₈ , A ₆ ' 与 B ₂ , A ₇ 与 B ₃ , A ₅ 与 B ₅ , A ₃ 与 B ₆ , A ₄ 与 B ₇	$simE_1(f_1^a, f_1^b) = 0$	$simE_2(f_2^a, f_2^b) = 0$
		$simE_3(f_3^a, f_3^b) = 0.5$	$simE_4(f_4^a, f_4^b) = 0$
		$simE_5(f_5^a, f_5^b) = 0$	$simE_6(f_6^a, f_6^b) = 0.5$
		$simE_7(f_7^a, f_7^b) = 1$	$simE_8(f_8^a, f_8^b) = 1$
		$simE_9(f_9^a, f_9^b) = 1$	$simE_{10}(f_{10}^a, f_{10}^b) = 1$

续 表

方案	对应顶点	对应边装配关系的相似度	$LS_{(a)} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \times simE_i(f_i^A, f_i^B)}{\sum_{i=1}^n w_i} \times \frac{2 \times n}{N_A + N_B}$
3	A ₈ 与 B ₁ , A ₂ 与 B ₂ , A ₆ ' 与 B ₈ , A ₇ 与 B ₃ , A ₅ 与 B ₆ , A ₃ 与 B ₅ , A ₄ 与 B ₇	$simE_1(f_1^a, f_2^b) = 0$	$simE_2(f_2^a, f_1^b) = 0$
		$simE_3(f_3^a, f_3^b) = 0.5$	$simE_4(f_4^a, f_5^b) = 1$
		$simE_5(f_5^a, f_4^b) = 1$	$simE_6(f_6^a, f_6^b) = 0.5$
		$simE_7(f_7^a, f_7^b) = 0$	$simE_8(f_8^a, f_8^b) = 1$
		$simE_9(f_9^a, f_9^b) = 0$	$simE_{10}(f_{10}^a, f_{10}^b) = 0$
0.333			
4	A ₈ 与 B ₁ , A ₂ 与 B ₂ , A ₆ ' 与 B ₈ , A ₇ 与 B ₃ , A ₅ 与 B ₅ , A ₃ 与 B ₆ , A ₄ 与 B ₇	$simE_1(f_1^a, f_2^b) = 0$	$simE_2(f_2^a, f_1^b) = 0$
		$simE_3(f_3^a, f_3^b) = 0.5$	$simE_4(f_4^a, f_5^b) = 1$
		$simE_5(f_5^a, f_4^b) = 1$	$simE_6(f_6^a, f_7^b) = 0.5$
		$simE_7(f_7^a, f_6^b) = 1$	$simE_8(f_8^a, f_8^b) = 1$
		$simE_9(f_9^a, f_{10}^b) = 1$	$simE_{10}(f_{10}^a, f_9^b) = 1$
0.58			
5	A ₈ 与 B ₇ , A ₂ 与 B ₆ , A ₆ ' 与 B ₅ , A ₇ 与 B ₃ , A ₅ 与 B ₈ , A ₃ 与 B ₂ , A ₄ 与 B ₁	$simE_1(f_1^a, f_9^b) = 0$	$simE_2(f_2^a, f_{10}^b) = 1$
		$simE_3(f_3^a, f_8^b) = 0.5$	$simE_4(f_4^a, f_6^b) = 0$
		$simE_5(f_5^a, f_7^b) = 0$	$simE_6(f_6^a, f_4^b) = 0.5$
		$simE_7(f_7^a, f_6^b) = 0$	$simE_8(f_8^a, f_3^b) = 0$
		$simE_9(f_9^a, f_{10}^b) = 0$	$simE_{10}(f_{10}^a, f_2^b) = 0$
0.17			
6	A ₈ 与 B ₇ , A ₂ 与 B ₆ , A ₆ ' 与 B ₅ , A ₇ 与 B ₃ , A ₅ 与 B ₂ , A ₃ 与 B ₈ , A ₄ 与 B ₁	$simE_1(f_1^a, f_9^b) = 0$	$simE_2(f_2^a, f_{10}^b) = 1$
		$simE_3(f_3^a, f_8^b) = 0.5$	$simE_4(f_4^a, f_6^b) = 0$
		$simE_5(f_5^a, f_7^b) = 0$	$simE_6(f_6^a, f_8^b) = 0.5$
		$simE_7(f_7^a, f_4^b) = 1$	$simE_8(f_8^a, f_3^b) = 0$
		$simE_9(f_9^a, f_2^b) = 0$	$simE_{10}(f_{10}^a, f_{10}^b) = 0$
0.25			
7	A ₈ 与 B ₇ , A ₂ 与 B ₅ , A ₆ ' 与 B ₆ , A ₇ 与 B ₃ , A ₅ 与 B ₈ , A ₃ 与 B ₂ , A ₄ 与 B ₁	$simE_1(f_1^a, f_{10}^b) = 1$	$simE_2(f_2^a, f_9^b) = 0$
		$simE_3(f_3^a, f_8^b) = 0.5$	$simE_4(f_4^a, f_7^b) = 1$
		$simE_5(f_5^a, f_6^b) = 1$	$simE_6(f_6^a, f_4^b) = 0.5$
		$simE_7(f_7^a, f_5^b) = 0$	$simE_8(f_8^a, f_3^b) = 0$
		$simE_9(f_9^a, f_{10}^b) = 0$	$simE_{10}(f_{10}^a, f_2^b) = 0$
0.333			
8	A ₈ 与 B ₇ , A ₂ 与 B ₅ , A ₆ ' 与 B ₆ , A ₇ 与 B ₃ , A ₅ 与 B ₂ , A ₃ 与 B ₈ , A ₄ 与 B ₁	$simE_1(f_1^a, f_{10}^b) = 1$	$simE_2(f_2^a, f_9^b) = 0$
		$simE_3(f_3^a, f_8^b) = 0.5$	$simE_4(f_4^a, f_7^b) = 1$
		$simE_5(f_5^a, f_6^b) = 1$	$simE_6(f_6^a, f_5^b) = 0.5$
		$simE_7(f_7^a, f_4^b) = 1$	$simE_8(f_8^a, f_3^b) = 0$
		$simE_9(f_9^a, f_2^b) = 0$	$simE_{10}(f_{10}^a, f_{10}^b) = 0$
0.417			

表 3 实例相似度及对应顶点

子图匹配成功事例	子图匹配	子图匹配成功方案个数	匹配成功图边数 n	装配体局部结构的最大相似度 LS_{Max}	是否最终匹配事例	匹配后对应顶点
b) 和 a)	成功	8	10	0.58	是	A ₈ , B ₁ ; A ₂ , B ₂ ; A ₆ ', B ₈ ; A ₇ , B ₃ ; A ₃ , B ₆ ; A ₅ , B ₅ ; A ₄ , B ₇
b) 和 e)	成功	12	5	0.42	否	
c) 和 a)	失败				否	
c) 和 e)	成功	8	5	0.77	是	C ₆ , E ₃ ; C ₁ , E ₂ ; C ₃ , E ₁ ; C ₅ , E ₄
d) 和 a)	成功	8	10	0.792	是	A ₈ , D ₁₀ ; A ₂ , D ₁ ; A ₆ ', D ₂ ; A ₇ , D ₅ ; A ₃ , D ₃ ; A ₅ , D ₈ ; A ₄ , D ₄
d) 和 e)	成功	8	5	0.47	否	

在 B, A 匹配的对应顶点中, 轴承外圈套筒 A_2 与轴承外圈套筒 B_2 相对应; 轴承 A_7 与轴承 B_3 相对应; 轴承内圈定位 A_3 与轴承内圈定位 B_6 相对应; 轴 A_5 与轴 B_5 相对应; 螺母 A_4 与 B_7 相对应。

在 D, A 匹配的对应顶点中, 螺钉 A_8 与螺钉 D_{10} 相对应; 轴承外圈套筒 A_2 与轴承外圈机座 D_1 相对应; A'_6 与 D_2 相对应; 轴承 A_7 与轴承 D'_5 相对应; 轴承内圈定位 A_3 与轴承内圈定位 D_3 相对应; 轴 A_5 与轴 D_8 相对应; 螺母 A_4 与螺母 D_4 相对应。

在 C 和 E 匹配的对应顶点中, 螺钉 C_6 与销 E_3 相对应; 端盖 C_1 与 E_2 相对应; 机座 C_3 与机座 E_1 相对应; 轴承、轴合并顶点 C'_5 与轴承、轴合并顶点 E'_4 相对应。

由实验结果可看出, 本文方法用于装配体局部结构匹配、检索是可行的和可信的。

5 结 语

本文提出了基于子图同构与事例匹配的装配体局部结构相似性分析方法, 该方法将装配体中零件间的关系用 AAG 来表示, 清晰地描述装配体中零件间的装配关系, 并在图、子图同构的基础上进行相似度计算, 能较好地匹配出相近的装配体局部结构, 为 CBR 的装配规划奠定了基础。我们今后将以此为基础, 研究事例选取、装配体结构划分及 CBR 的装配顺序规划等技术。

参考文献 (References):

- [1] von Wangenheim C G. Case-based reasoning—a short introduction [R]. Florianopolis: Federal University of Santa Catarina, Iknow002.00E, 2000
- [2] Zhang Xutang, Liu Wenjian. Research on assemblies retrieval and indexing based on bipartite graph [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2005, 17(9): 2106-2111 (in Chinese)
(张旭堂, 刘文剑. 基于二分图的装配体检索研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(9): 2106-2111)
- [3] Su Qiang, Lai Shengjie. An improved genetic algorithm designed for CBR-based assembly sequence planning [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007, 41(8): 1233-1237 (in Chinese)
(苏 强, 赖盛杰. 基于事例推理的装配顺序规划中的遗传算法改进设计[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(8): 1233-1237)
- [4] Dong T Y, Tong R F, Zhang L, et al. A collaborative approach to assembly sequence planning [J]. Advanced Engineering Informatics, 2005, 19(2): 155-168
- [5] Seo Y, Sheen D, Kim T. Block assembly planning in shipbuilding using case-based reasoning [J]. Expert Systems with Applications, 2007, 32(1): 245-253
- [6] Barletta R. An introduction to case-based reasoning [J]. AI Expert, 1991, 6(8): 43-49
- [7] Babic B, Nestic N, Miljkovic Z. A review of automated feature recognition with rule-based pattern recognition [J]. Computers in Industry, 2008, 59(4): 321-337
- [8] Li Yongli, Zhang Shuyou, Liu Zhenyu. Product assembly design based on semantics in VRML environment [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2003, 15(2): 209-214 (in Chinese)
(李永立, 张树有, 刘振宇. VRML 环境下基于语义的产品装配设计技术研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003, 15(2): 209-214)
- [9] Li Xiantong, Li Jianzhong, Gao Hong. An efficient frequent subgraph mining algorithm [J]. Journal of Software, 2007, 18(10): 2469-2480 (in Chinese)
(李先通, 李建中, 高 宏. 一种高效频繁子图挖掘算法[J]. 软件学报, 2007, 18(10): 2469-2480)
- [10] Ullmann J R. An algorithm for subgraph isomorphism [J]. Journal of the Association for Computing Machinery, 1976, 23(1): 31-42