

DOI:10.16356/j.1005-2615.2018.03.015

基于图和子图同构算法的制造特征识别方法

谢 飞 郭 宇 张红蕾 王发麟 黄 潇

(南京航空航天大学机电学院,南京,210016)

摘要:针对传统制造特征难以快速识别的难题,提出了基于图和子图同构算法的制造特征识别方法。通过提取零件模型中的几何信息与拓扑信息,构造出加权属性邻接图,对零件模型进行精准描述,为建立制造特征库,定义了文件数据的存储结构,结合子图同构算法以及相关判定规则实现对常见制造特征的识别与匹配。以 Creo 软件中生成的零件模型为例,在 VS2010 平台中进行二次开发,最后以界面窗口形式展示识别结果,验证了该方法的有效性。

关键词:制造特征;特征识别;加权属性邻接图;子图同构

中图分类号:TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2018)03-0390-07

Manufacturing Feature Recognition Based on Graph and Subgraph Isomorphism Algorithm

XIE Fei, GUO Yu, ZHANG Honglei, WANG Falin, HUANG Xiao

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Due to the problem that the traditional manufacturing feature could not be identified quickly, an approach of manufacturing feature recognition is presented based on graph and subgraph isomorphism algorithm. By extracting the geometric and topological information of 3D part model, the paper constructs a weighted attributed adjacency graph to describe it accurately. In order to establish the libraries of manufacturing feature, the storage structure of the file data is defined. The system could recognize and match common manufacturing feature combined with the subgraph isomorphism algorithm and relevant decision rules. The secondary development is conducted under the platform of VS2010 and the recognition results are displayed finally with a windowing interface to verify the validity of the method.

Key words: manufacturing feature; feature recognition; weighted attributed adjacency graph; subgraph isomorphism

特征识别技术对于实现 CAD 与 CAPP 的有效集成有着关键意义,当前的三维建模软件所绘制的零件仅仅是设计特征的集合,由于设计人员与工艺人员在零件模型理解上的不同,导致工艺人员较难利用设计人员的三维零件模型生成其需要的三维工序模型。传统工艺方法相对落后,存在着信息

孤岛,无法有效地继承和利用三维模型的相关信息,工艺数据亦难以用合理的方式表达、获取和管理,特征识别作为零件三维工序模型的快速生成关键技术之一显得尤为重要。

特征识别通过提取分析三维工序模型的几何和拓扑信息,对模型上的生成面选择性组合得到可

基金项目:国家自然科学基金(51575274)资助项目;国防基础科研(A1120131044)资助项目。

收稿日期:2016-11-14;**修订日期:**2017-03-13

通信作者:郭宇,男,教授,博士生导师,E-mail:guoyu@nuaa.edu.cn。

引用格式:谢飞,郭宇,张红蕾,等.基于图和子图同构算法的制造特征识别方法[J].南京航空航天大学学报,2018,50(3):390-396. XIE Fei, GUO Yu, ZHANG Honglei, et al. Manufacturing feature recognition based on graph and subgraph isomorphism algorithm[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(3): 390-396.

用于生产加工的制造特征。特征识别对于实现CAD/CAM/CAPP的有效集成具有非常重要的意义。复杂特征如组合特征的识别技术一直是领域内的难题。自特征识别这一概念提出以来,国内外研究人员一直在进行广泛而深入的研究。

目前比较常用的特征识别方法包括逻辑规则(if-then)与专家系统^[1]、基于图的方法^[2]、凸包体积分解法、基于细胞的体积分解法^[1]、基于痕迹^[1]的方法以及混合方法。基于图的识别方法最早由Joshi等^[2]提出,旨在建立一个包括拓扑信息和部分几何信息的零件表达式,其核心思想是将实体的边界表示为属性邻接图,采用启发式规则、神经网络和子图同构等方式进行特征识别。基于这一方法的技术已广泛应用于后续的研究中,甚至一些商业化的工艺规划软件也采用了该技术。该方法的优势在于图的表达方式简单明了,可以很好地识别独立特征,缺点是无法识别具有复杂曲面的相交特征,因为特征相交会造成原特征拓扑信息的丢失。凸包和基于细胞体的分解方法^[1]均属于体积分解法。此方法先将输入的零件模型分解成一系列的中间凸体,然后使用交替和差分解法(Alternating sum of volumes, ASV)对这些中间凸体进行收敛运算以形成特征并进行类型判断。起初该方法成功地应用于多面体零件,但却无法保证重新组合而成的特征是有效的加工特征,穷举每一种可能组合的计算量太过庞大,计算复杂度也急剧上升。文献^[1]在面向对象的特征查找系统(Object-oriented feature finder, OOFF)中率先提出基于痕迹^[1]的方法来处理相交特征,该方法是逻辑法和增量体积法的结合。其中三维零件模型的拓扑信息、几何信息和启发式信息等共同构成了特征存在的痕迹,认为特征加工过程中会在零件的边界留下相关的痕迹,通过定义存在性规则完成特征识别,但很难找到正确且合适的特征痕迹,因此也存在不小的局限性。文献^[3]提出了最小条件子图法进行相交特征的识别,此方法综合了传统的基于图识别和基于痕迹识别的方法,同时还引入了Marefat等的虚链概念,以扩展属性零件图(Extended attributed adjacency graph, EAAG)的方式表示零件模型,然而该方法无法确保找到所有必需的虚链,还要排除大量错误的特征假设,方法局限于多面体对象,因此无法用于大多数常见特征的识别。

由于特征的创建缺乏统一的规范,这就可能导致同一几何形状的特征存在多种完全不同的生成方法,此外有些特征包含复杂轮廓曲面,难以用初等解析函数完全明确表达出来,故如何对零件模型所包含的几何信息和拓扑信息进行提取和重新融

合并迅速地将其转换为制造特征,成为制造特征快速识别的难点。此外,图的大小与特征的复杂程度成正比,搜索空间及候选匹配对序列数量十分庞大,导致已有方法的运行耗时呈指数级增长,特征识别速度较慢。

针对特征识别中遇到的难点以及以上各方法的局限性,本文提出了基于图和子图同构算法的制造特征识别方法(Manufacturing feature graph algorithm, MFGA)。首先分析了典型零件制造特征的特点,确定了可识别制造特征的范围,然后从零件模型文件中提取所需的几何与拓扑信息,生成加权属性邻接图,最后利用改进的子图同构算法辅以特征判定规则完成特征的匹配与识别。

1 典型零件制造特征

零件的制造特征指包含加工信息、具有明显制造意义的几何形状部分,是经过相关的工艺方法加工后形成的。例如车削工艺会形成回转表面,典型的有圆柱面、圆锥面等;铣削工艺会形成平面、槽和成形曲面等。由于制造过程中选用的工艺方法不同、刀具种类繁多,最终会形成各类不同的制造特征。

本文将典型零件制造特征简单划分为两类:简单特征与复杂特征,如图1所示。其中简单特征指无法拆分且拥有加工意义的几何形状部分,主要分为孔、倒角、平面、简单槽腔和初等解析曲面等。复杂特征包括组合特征和自由曲面等,组合特征是由多种基本特征进行组合所得的特征,例如常见的多阶孔、复杂腔槽等;自由曲面通常由曲线和曲面经



图1 制造特征分类

Fig. 1 Classification of manufacturing feature

过自由变化生成,无法用初等解析函数完全明确表达出来,主要指零件模型中的复杂轮廓等特征。

在制造过程中,随着既定工序和工步等加工操作的有序完成,零件模型的制造特征亦在不断演变。由毛坯开始渐渐形成简单特征,随着制造过程的进行,其中部分简单特征在经过多次加工操作后,会逐渐向复杂特征演变,因此零件的最终形状可以定义为简单特征和复杂特征的集合。

2 零件信息提取

基于三维零件模型制造特征识别的具体过程如图2所示。显然,欲构建零件的属性邻接图以完成特征识别首先需要提取零件的几何信息与拓扑信息。

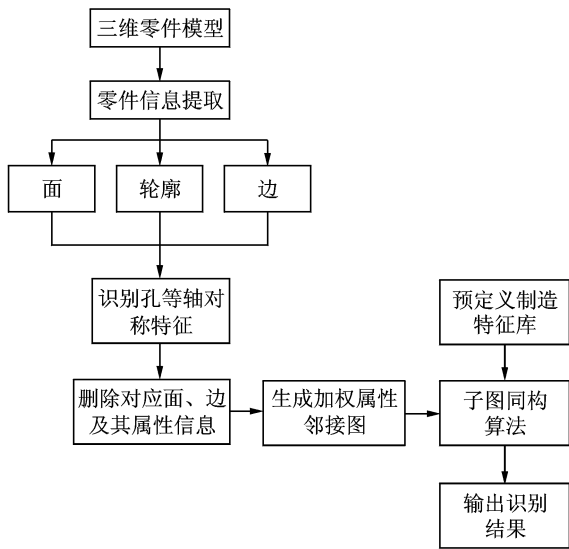


图2 零件制造特征识别流程

Fig. 2 Recognition process of manufacturing feature

三维零件模型通常采用 B-rep (Boundary representation) 方法表示,特征可被定义为零件模型上互相关联的面的集合。基于 B-rep 的模型其几何与拓扑信息经由面和边形成的图数据结构清晰地表达出来,因此需要根据面、环和边的包含关系逐层提取零件信息。其基本流程分为以下几个步骤:(1)调用实体特征访问函数遍历访问零件模型的所有可见特征并保存;(2)分别调用面、轮廓与边的遍历函数等逐层访问零件模型相应的面、轮廓和边,利用循环语句对每一个面分别调用特征属性值访问函数分别提取出每个面的 ID 值(标识符)、面的类型、面所包含的所有轮廓以及轮廓上的全部边、边的 ID 值和边的类型等信息,并将以上所有获取到的信息保存到文件中。零件的各项信息提取流程如图3所示。

遍历模型获取的全部面分别对应属性邻接图

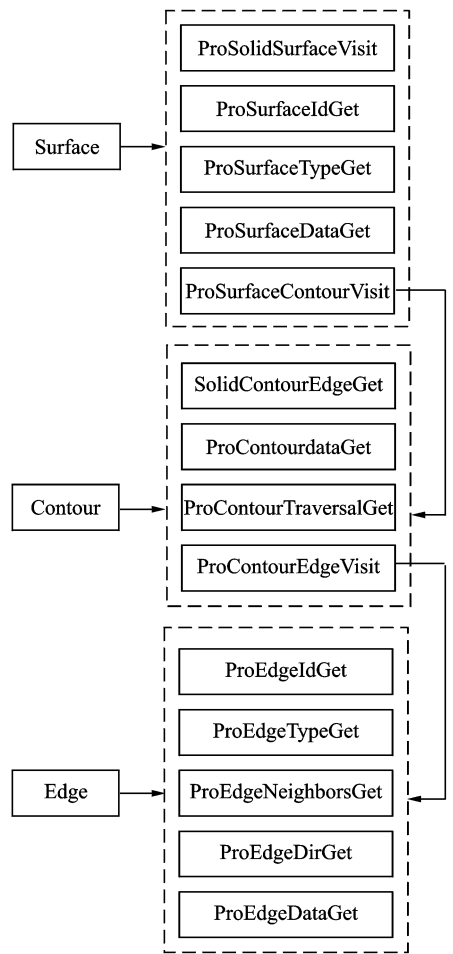


图3 零件模型各项信息提取流程

Fig. 3 Information extraction process of part

中的各个节点,然而由于模型文件中各个面的 ID 值是任意的,因此使用符号表将 N 个面节点的 ID 值与从 0 到 $N-1$ 的整数建立一对一映射。通过数组可以快速访问该节点下对应的所有边,与此同时也大大简化了后续的特征匹配与识别过程。

属性邻接图不仅包含了拓扑连接关系,即节点与边的连接关系,而且包含了语义信息,即面节点和边的属性信息,具体指面、边的类型以及边的凹凸性。只有将这些信息全部确定后才能获得零件模型完整的属性邻接图,从而进行特征子图匹配。需要注意的是,Creo 使用 ACIS 为造型内核,其中的圆柱面或圆锥面使用两个等同的半圆柱/圆锥面来表示。若将两个半圆柱/圆锥面均纳入属性邻接图中,会导致边的重复遍历,并且会产生冗余边,故通过其他方法^[4]先识别出孔、锥面等轴对称特征,将表示轴对称特征的面和边从属性邻接图中删除,生成新的属性邻接图,然后再进行边的凹凸性^[5-8]判定。通过调用相关函数获取包含某条边的两个邻面及其邻接边的 ID 值,如图4所示,根据两邻面的法向量 $N_1 = (A, B, C)$ 和 $N_2 = (X, Y, Z)$ 按式(1)

计算出两个面的夹角 θ ,有

$$\theta = \arccos\left(\frac{AX+BY+CZ}{\sqrt{A^2+B^2+C^2}\sqrt{X^2+Y^2+Z^2}}\right) \times \frac{\pi}{180} \quad (1)$$

根据计算出的夹角 θ ,定义边的权值为

$$W(e) = \begin{cases} 0 & \theta \in (0, \pi) \\ 1 & \theta \in (\pi, 2\pi) \end{cases} \quad (2)$$

为简化属性邻接图,对零件模型中边的属性进行简单量化,以权值 0 和 1 区分边的凹凸性。

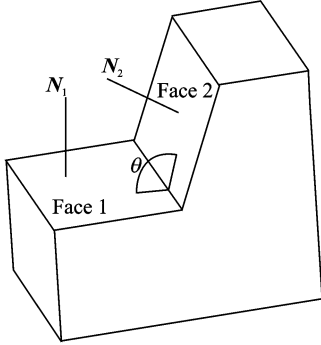


图 4 邻面夹角示意图

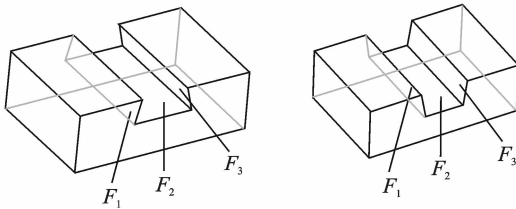
Fig. 4 Angle diagram of adjacent surfaces

3 加权属性邻接图的构造与存储

通常地,图采用邻接矩阵和邻接表两种存储表示方法。传统无向图的邻接矩阵是对称的,可使用压缩存储法以节省空间,但矩阵内的值仅有 0 和 1,在进行图匹配时容易产生较高的不确定性。图的邻接表采用指针数组表示,指针占用的空间略大,操作较为复杂容易出错。

如图 5 所示,通槽 1 与通槽 2 形状不同,但是其对应的邻接矩阵却完全相同。

为消除传统邻接矩阵在图匹配时的不确定性,避免邻接表的复杂运算操作,结合应用平台以及相关的特征识别算法,本文构造了全新的加权属性邻接图以解决上述问题。与此同时,使用链式前向星来存储加权属性邻接图的结构,链式前向星是邻接



$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

(a) Through slot 1

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

(b) Through slot 2

图 5 通槽及其对应邻接矩阵

Fig. 5 Through slot and corresponding adjacency matrix

链表的数组实现方式,对于无向图实现起来简单,存储权值时可节省一半空间。定义加权属性邻接图为

$$G = \langle V, E, k, t \rangle \quad (3)$$

$$\begin{cases} \forall v \in V, \exists fs \in FS, g(v) = fs \\ \forall fs \in FS, \exists v \in V, g(fs) = v \end{cases} \quad (4)$$

式中: V 表示图 G 中所有节点的集合, FS 为零件模型的面集合。对于集合内的任一元素 v ,均有零件模型中的面 fs 与之一一映射(以 g 表示映射关系), E 表示图 G 中所有边的集合,对于集合内任一元素均有零件模型中两个相邻面 fs_i 与 fs_j 的公共边与之一一映射,有

$$\forall \langle fs_i, fs_j \rangle \in FS, \exists e \in E, g(\langle fs_i, fs_j \rangle) = e \quad (5)$$

k 表示图 G 中面节点的属性集合,以数字 1, 2, 3, 4, ... 表示不同类型的面,例如 1 表示平面, 2 表示圆柱面, 3 表示圆锥面等。

t 表示图 G 中边的属性集合。类似地,以数字 1, 2, 3, 4, ... 表示不同类型的边,例如 1 表示直线, 2 表示圆弧, 3 表示椭圆,同时分别以 0 和 1 表示边的凹凸性。考虑到统一表示和方便存储的需求,以两位数表示边的详细属性,十位和个位上分别存储边的类型值与凹凸性值。

根据以上所述,构造出与零件模型唯一对应的链式前向星。其在文件中的存储格式定义如图 6 所示。

```

g # N
V M1 L1
⋮
V Mn Ln
E P1 Q1 A1 B1 ang1
⋮
E Pk Qk Ak Bk angk
    
```

图 6 文件存储格式示例

Fig. 6 Example of file storage format

其中:(1)“g # N”:第 N 个图结构, $N=0, 1, 2, 3, \dots$ 如式(6)所示,自行定义第 0 个图结构表示一般盲槽特征(Blind slot),第 1 个图结构表示一般通槽特征(Through slot),依次类推,则

$$N = \begin{cases} 0 & \text{feature} = \text{Blind slot} \\ 1 & \text{feature} = \text{Through slot} \\ 2 & \text{feature} = \text{Cylinder} \\ 3 & \text{feature} = \text{Cone} \\ & \vdots \end{cases} \quad (6)$$

(2)“V M L”:V 表明该行描述对象为节点,即图中第 M 个节点,每一个节点都对应该特征的一个面, L 为其对应的属性值。

(3)“E P Q AB ang”:E 表明该行描述对象为边,表示连接节点 P 与节点 Q 的边,AB 为其对应的属性值,ang 为面 P 与面 Q 的夹角,其值分别设

为 0,1,2,3,4。具体角度值对应关系如式(7)所示,则

$$\text{ang} = \begin{cases} 0 & \theta \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right) \\ 1 & \theta = \frac{\pi}{2} \\ 2 & \theta \in \left(\frac{\pi}{2}, \pi\right) \\ 3 & \theta = \frac{3\pi}{2} \\ 4 & \theta \in \left(\pi, \frac{3\pi}{2}\right) \cup \left(\frac{3\pi}{2}, 2\pi\right) \end{cases} \quad (7)$$

相应地,为常见的制造特征预定义文件数据结构并存入特征制造库中,用于后续的特征匹配,如表1所示。

表1 几种常见特征

Tab.1 Several common features

特征	模型示意图	核心数据结构
一般盲槽		g # 0 V 0 1 V 1 1 V 2 1 V 3 1 E 0 1 10 2 E 1 2 10 2 E 1 3 10 1 E 2 3 10 0 E 0 3 10 0
一般通槽		g # 1 V 0 1 V 1 1 V 2 1 E 0 1 10 2 E 1 2 10 2
直角通槽		g # 2 V 0 1 V 1 1 V 2 1 E 0 1 10 1 E 1 2 10 1
盲台阶		g # 3 V 0 1 V 1 1 V 2 1 E 0 1 10 1 E 1 2 10 1 E 0 2 10 1
通台阶		g # 4 V 0 1 E 0 1 10 1

4 特征识别

4.1 特征识别算法

图形匹配算法按精度分为精确匹配和模糊匹配,特征识别所涉及到的子结构匹配即为精确匹配。假定零件模型的属性特征图为 G_a , 制造特征

库中某一特征的属性邻接图为 G_b , 进而判断图 G_a 与图 G_b 是否是子图同构,即能否在图 G_a 中搜寻到一个子结构与图 G_b 完全匹配。子图同构是一个 NP-complete 问题,匹配算法所需时间随着输入图的扩大呈指数级增大。当前主要采用回溯算法完成图匹配,结合一些启发式规则对搜索树进行剪枝,大大降低了匹配复杂度,主要包括最早的 Ullmann 算法^[9]、SD 算法^[10]、VF 及 VF2 算法^[11]。其中以 VF2 算法性能最好,相比于 Ullmann 算法,VF2 算法的复杂度较小,也比较适用于处理大规模的数据。最快的同构算法是 McKay 所提出的 Nauty 算法^[12],然而 Nauty 算法只能用于结构完全匹配,并不能用于子结构匹配。

4.2 子图同构算法

给定图 $G_a = (V(G_a), E(G_a), k_a, t_a)$ 和图 $G_b = (V(G_b), E(G_b), k_b, t_b)$ 。对于任意的 $v_{am}, v_{an} \in V(G_a)$,若存在映射 g ,有 $v_{am} \xrightarrow{g} v_{bm}, v_{an} \xrightarrow{g} v_{bn}$,其中 $v_{bm}, v_{bn} \in V(G_b)$ 。如果 $(v_{am}, v_{an}) \in E(G_a)$,而 $(v_{bm}, v_{bn}) \in E(G_b)$,那么称图 G_a 与图 G_b 同构。特别地,若图 G_a 与图 G_b 的部分子图同构,则称图 G_a 与图 G_b 子图同构。

图7(a)为图同构示意图,图对应关系为 2-1-3 \rightarrow 1-2-3 或者 2-1-3 \rightarrow 3-2-1,确切的对应关系还需依赖节点属性作进一步判定。图7(b)为子图同构示意图,子图对应关系有以下6种情况:2-1-3 \rightarrow 2-1-3, 2-1-3 \rightarrow 2-1-4, 2-1-3 \rightarrow 4-1-2, 2-1-3 \rightarrow 4-1-3, 2-1-3 \rightarrow 3-1-2, 2-1-3 \rightarrow 3-1-4,确切的对应关系同样依赖节点属性判定。图7(a)与图7(b)中均以虚线箭头表示了其中一种对应关系。

基于子图同构算法的制造特征识别其本质是将零件模型提取出的加权属性邻接图与预定义的特征库进行匹配,这其中同时涉及到节点与边的类

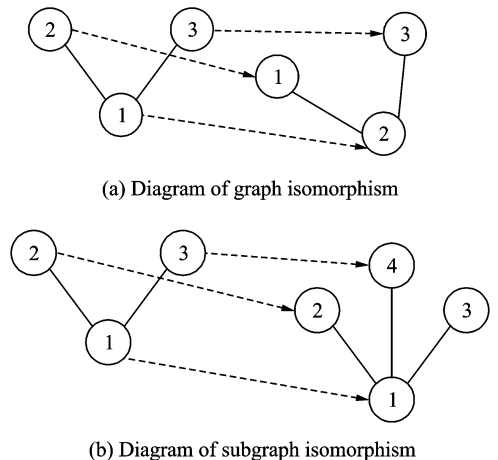


图7 图同构示意图

Fig.7 Diagram of graph isomorphism

型和属性信息匹配判断。综上所述,本文以 VF2 算法为基础,结合自定义的特征判定规则,实现制造特征的快速识别。

4.3 特征识别步骤

特征识别的具体实现步骤如下:

(1)读取图 G_a ,从制造特征库读取图 G_i ,令 $i=0$;同时初始化匹配集 $M(s_0)=\emptyset$ 。

(2)图 G_a 的节点数和边数目分别为 n_a 和 e_a , G_i 的节点数和边数目分别为 n_i 和 e_i ,判断 $n_i \leq n_a$ 且 $e_i \leq e_a$ 。若满足条件,进入步骤(3);否则 $i=i+1$,返回步骤(1)。

(3)任选 G_a 的某一节点 q_1 ,寻找 G_i 中与其匹配的节点 t_1 。若成功,将匹配对 (q_1, t_1) 存入匹配集 $M(s)$,令 $\text{Num.}(M(s))=1$,进入步骤(4),否则选取 G_a 中的另一个节点 q_2 重新寻找匹配点。

(4)沿匹配点的邻接点继续匹配,得到新的匹配对 (q, t) , $\text{Num.}(M(s))=\text{Num.}(M(s))+1$;每次匹配不成功时均回溯至上一级匹配成功的点,尝试匹配邻接点中的其余节点。

(5)若 $\text{Num.}(M(s))=n_i$,则表示在 G_a 中存在与 G_i 同构的子图,识别出对应特征并输出结果。

(6) $i=i+1$,返回步骤(1),继续搜寻 G_a 中是否存在制造特征库中的其他特征,直至制造特征库被完全遍历。

4.4 特征判定规则

为提高特征识别匹配的效率,需对新产生的匹配对 (q, t) 进行可行性校验,从而实现对全部搜索空间的剪枝优化。定义 N_a 和 N_i 分别为图 G_a 和 G_i 的点集, q 和 t 分别为图 G_a 和 G_i 中的一个点。 $\text{Pred}(G, q)$ 表示点 q 在图 G 中的前驱节点集合, $\text{Succ}(G, q)$ 表示点 q 在图 G 中的后继节点集合。 $T_a^{\text{in}}(s)$ 和 $T_i^{\text{in}}(s)$ 分别表示状态 s 在图 G_a 和 G_i 中所有已经匹配节点的源点集合, $T_a^{\text{out}}(s)$ 和 $T_i^{\text{out}}(s)$ 分别表示状态 s 在图 G_a 和 G_i 中所有已经匹配节点的终点集合。特别地,由于本文中的加权属性邻接图为无向图,故每个节点的邻接点既是它的前驱节点又是它的后继节点,则

$$\text{Pred}(G, q) = \text{Succ}(G, q) \quad (8)$$

$$T^{\text{in}}(s) = T^{\text{out}}(s) \quad (9)$$

详细规则表示为

$$Ru_{\text{sem}}(s, q, t) \Leftrightarrow (q.\text{label} = t.\text{label}) \wedge (q.\text{adjacenyedgenum} \geq t.\text{adjacenyedgenum}) \quad (10)$$

$$Ru_{\text{pred}}(s, q, t) \Leftrightarrow (\forall q' \in M_a(s) \cap \text{Pred}(G_a, q), \exists t' \in \text{Pred}(G_i, t) | (q', t') \in M(s)) \wedge (\forall t' \in M_i(s) \cap \text{Pred}(G_i, t), \exists q' \in \text{Pred}(G_a, q) | (q', t') \in M(s)) \quad (11)$$

$$Ru_{\text{in}}(s, q, t) \Leftrightarrow \text{Card}(\text{Succ}(G_a, q) \cap T_a^{\text{in}}(s)) \geq \text{Card}(\text{Succ}(G_i, t) \cap T_i^{\text{in}}(s)) \quad (12)$$

其中:式(10)为语义判定规则,保证了候选匹配对 (q, t) 两节点对应的 label 值必须相同,且节点 q 的邻接边数目必须不小于节点 t 的邻接边数目,否则该匹配对无效,循环判定下一匹配对。式(11)为同构规则,确保加入新的匹配对后两个子图仍旧同构。式(9)表示 q 在图 G_a 中的所有前驱节点,均能在图 G_i 中 t 节点的前驱节点找到相应点与之对应。反之, t 在图 G_i 中的所有前驱节点,亦均能在图 G_a 中 q 节点的前驱节点找到相应点与之对应。由于无向图的特性(式(8)),可以发现后继节点的判定规则与式(11)完全一致,故不另行再作判定。式(12)为剪枝规则,Card 表示求该集合中元素的个数。式(12)表示 q 在 $T_a^{\text{in}}(s)$ 中的前驱数目必须大于等于 t 在 $T_i^{\text{in}}(s)$ 中的前驱数目,后继节点亦不做重复判定。

以相同的图数据结构为基准,测试 Ullmann 算法、VF2 算法和 MFGA 三者在不同节点数下的运行耗时,测试结果如图 8 所示。显然,当节点数相同时 GSgi 运行耗时明显优于 Ullmann 与 VF2 算法。

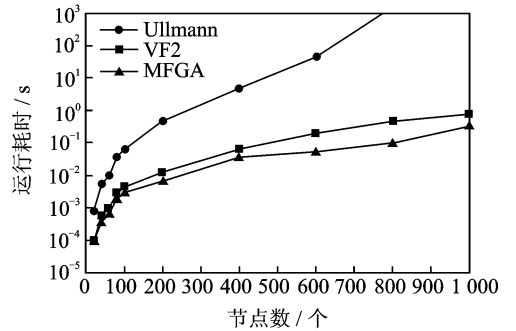


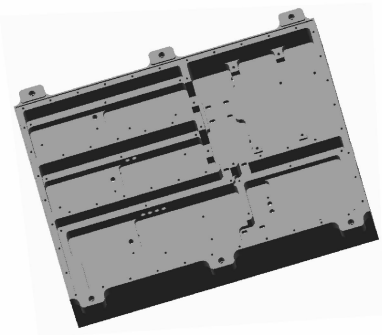
图 8 算法运行耗时对比

Fig. 8 Running time comparison of several algorithms

通过以上规则的限制,对同构算法进行优化,可以有效减少候选匹配对的数目,从而加快了算法的运行速度,优化其执行效率,最终该方法可实现对简单特征和部分复杂特征的有效识别。

5 特征识别实例

在 Creo2.0 平台上构建零件模型,使用 Microsoft Visual Studio 2010 编写算法程序,结合 Pro/Toolkit 二次开发函数库对输入零件模型所需信息及相关属性进行提取,对文中所提的基于图和特征子图算法的制造特征识别方法进行验证,给出示例零件模型如图 9(a)所示。由于零件较为复杂,故仅给出其对应加权属性邻接图的部分文本数据行,如图 9(b)所示。



(a) The sample part

t#1	E 0 1 10 1
V 0 1	E 0 2 20 1
V 1 1	E 0 3 10 1
V 2 2	E 0 4 20 1
V 3 1	E 0 5 10 1
V 4 2	E 0 6 20 1
V 5 1	E 0 7 10 1
V 6 2	E 0 8 10 1
V 7 1	⋮
V 8 1	⋮

(b) Data storage file of part

图9 示例零件及各项数据内容

Fig. 9 Sample part and relevant data contents

6 结束语

本文提出了应用于Creo零件模型的制造特征快速识别方法。通过定义加权属性邻接图和文件数据结构,结合子图同构算法对零件模型进行特征识别,此外为算法添加了一系列的判定规则,以提高识别速度,减少程序运行的等待时间。该方法可实现对零件模型制造特征的有效识别,最后通过模型实例验证了该方法的可行性。

参考文献:

- [1] BABIC B, NESIC N, MILJKOVIC Z. A review of automated feature recognition with rule-based pattern recognition[J]. *Computers in Industry*, 2008, 59(4): 321-337.
- [2] JOSHI S, CHANG T C. Graph-based heuristics for recognition of machined features from a 3D solid model[J]. *Computer-Aided Design*, 1988, 20(2): 58-66.
- [3] MA Lujie, HUANG Zhengdong, WANG Yanwei. Automatic discovery of common design structures in CAD models[J]. *Computers & Graphics*, 2010, 34(5):545-555.
- [4] SUNIL V B, AGARWAL R, PANDE S S. An approach to recognize interacting features from B-Rep CAD models of prismatic machined parts using a hybrid (graph and rule based) technique[J]. *Computers in Industry*, 2010,61(7):686-701.
- [5] 田富君,田锡天,耿俊浩,等. 基于轻量化模型的加工特征识别技术[J]. *中国机械工程*, 2010, 18: 2212-2217.
TIAN Fujun, TIAN Xitian, GENG Junhao, et al. Machining feature recognition based on lightweight model[J]. *China Mechanical Engineering*, 2010, 18: 2212-2217.
- [6] 付鹏,苑伟政. 基于STEP的特征识别技术及其实现[J]. *中国机械工程*, 2010, 11: 1334-1337.
FU Peng, YUAN Weizheng. Technology and implementation process of feature recognition based on STEP[J]. *China Mechanical Engineering*, 2010, 11: 1334-1337.
- [7] 莫蓉,刘蔚昕,万能,等. 三维工序模型加工特征环境匹配[J]. *机械科学与技术*, 2015, 34(4): 549-554.
MO Rong, LIU Weixin, WAN Neng, et al. Study on the environmental matching of machining feature for 3D process model[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2015, 34(4): 549-554.
- [8] 王军,欧道江,舒启林,等. 基于STEP-NC的相交特征识别技术[J]. *计算机集成制造系统*, 2014, 20(5): 1051-1061.
WANG Jun, OU Daojiang, SHU Qilin, et al. Interacting feature recognition technology based on STEP-NC[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2014, 20(5): 1051-1061.
- [9] ULLMANN J R. An algorithm for subgraph isomorphism[J]. *Journal of the ACM (JACM)*, 1976, 23(1):31-42.
- [10] SOMKUNWAR R, VAZE V M. A novel approach for graph isomorphism: Handling large graphs[C]// *Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*. [S. l.]: IEEE, 2017:1242-1247.
- [11] CORDELLA L P, FOGGIA P, SANSONE C, et al. A (sub) graph isomorphism algorithm for matching large graphs[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, 26(10): 1367-1372.
- [12] JÜTTNER A, MADARASI P. VF2⁺⁻ an improved subgraph isomorphism algorithm[J]. *Discrete Applied Mathematics*, 2018, 242:69-81.

