

## 融合制造语义的三维工序模型序列重用方法

乔虎<sup>1)</sup>, 何俊<sup>1)</sup>, 师治全<sup>1)</sup>, 向颖<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>(西安工业大学机电工程学院 西安 710021)

<sup>2)</sup>(陕西科技大学机电工程学院 西安 710021)  
(yingcara@hotmail.com)

**摘要:** 针对目前三维工序模型序列重用缺少对加工特征尺寸、加工精度、形位公差等制造信息的考虑, 不能很好地支持零件制造过程工艺设计重用的问题, 提出一种融合制造信息的三维工序模型序列重用方法。首先, 利用图同构原理对工艺路线中三维工序模型序列进行优化, 减少搜索空间; 然后, 利用子图同构对三维工序模型加工特征进行匹配, 通过融合制造信息对加工特征匹配进行预处理和相似性评价, 以获取具有最相似加工特征的三维工序模型; 其次, 设计三维工序模型序列优化算法获取同构的三维工序模型序列; 最后, 以某型轴零件工艺设计过程为例进行实例验证, 结果表明融合制造信息的三维工序模型序列重用方法能够准确地根据指定制造特征进行工艺设计重用, 具有良好的应用效果。

**关键词:** 三维工序模型; 子图同构; 模型检索; 三维工序模型序列重用  
中图分类号: TP391      DOI: 10.3724/SP.J.1089.2019.17288

## 3D Process Model Sequence Reuse Method Based on Manufacturing Semantics

Qiao Hu<sup>1)</sup>, He Jun<sup>1)</sup>, Shi Zhiquan<sup>1)</sup>, and Xiang Ying<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>(School of Mechatronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021)

<sup>2)</sup>(College of Mechanical & Electrical Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021)

**Abstract:** The lack consideration of manufacturing information such as manufacturing feature size, machining accuracy, form and position tolerance, etc. leads to the poor effect reuse of 3D process model sequence in parts manufacturing process. For that problem, this paper proposes a 3D process model sequence reuse method based on manufacturing semantics. Firstly, the 3D process model sequence in the process route is optimized by using graph isomorphism to reduce the search space. Secondly, the sub-image isomorphism is used to match the processing features of the 3D process model, and the manufacturing information is used to match the processing features to perform pre-processing and similarity evaluation, by which the 3D process model with the most similar processing features is obtained. Thirdly, a 3D process model sequence optimization algorithm is designed to obtain isomorphic three-dimensional process model sequences. Finally, the process design process of a certain shaft part is taken as an example to verify the results. The results show that the purposed method can accurately reuse process model sequence, and has good application effect.

**Key words:** 3D process model; graph isomorphism; model retrieval; 3D process model sequence reuse

收稿日期: 2018-06-15; 修回日期: 2019-05-26. 基金项目: 国家自然科学基金(51705392); 陕西省软科学研究计划(2019KRM152, 2019KRM203); 陕西省创新人才推进计划-青年科技新星项目(2019KJXX-060). 乔虎(1986—), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要研究方向为产品快速设计、数字化设计与制造; 何俊(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为三维装配模型多源信息演化; 师治全(1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为契合设计意图的三维装配模型信息多粒度重用方法; 向颖(1987—), 女, 博士, 讲师, 论文通讯作者, 主要研究方向为智能设计与智能制造.

机加工工艺设计是强经验性的制造活动,对工艺重用方法的研究一直是工艺设计的研究重点.据调查数据统计,复杂零件由于特征数量比较多,工艺规划的时间与数控加工时间的比例是 10:1<sup>[1]</sup>.但很多零件的特征结构和制造工艺具有很强的相似性.因此,在新零件的制造过程中,有效地进行已有的工艺重用,是提高产品加工质量、缩短加工准备时间、实现快速响应制造的重要途径之一<sup>[2]</sup>.对于工艺重用,当前大多是从零件的整体结构进行“粗糙”相似性检索,无法实现精准的局部特征级别相似性比较,不能满足工艺设计人员的检索要求.事实上,工艺设计人员对工艺重用更多关注的是局部特征相似性,他们不仅想找到整体结构相似的零件,而且希望精确地找到局部特征相似的零件,这样可以更好地实现工艺重用.如何从大量的零件加工工艺中快速、高效地找到适合于工艺重用的局部特征已成为研究的重点.

当前,许多对“相似零件结构具有相似工艺”的研究认为,相似的零件具有相似的加工方法和工艺路线,并据此对零件的工艺进行相似性判定.Márkus 等<sup>[3]</sup>采用状态优先图表达零件及其工艺规划.Humm 等<sup>[4]</sup>针对回转体零件提出基于实例和创成式的混合式 CAPP 系统.严键等<sup>[5]</sup>的基于本体映射的零件工艺实例重用方法,将本体作为新零件工艺与零件库实例零件工艺的知识映射和信息转换的媒介,通过本体间相似度计算完成新零件工艺实例的检索和重用.如何从大量的零件加工工艺中快速、高效地找到适合于工艺重用的局部特征,相关研究有:Liao<sup>[6]</sup>应用模糊集合理论定义零件的模糊特征.李双跃等<sup>[7]</sup>利用面向对象与特征建模技术构建制造工艺资源的特征模型.Grabowik 等<sup>[8]</sup>为每个零件实例建立了一个索引.Chen 等<sup>[9]</sup>提出在提取局部特征时使用尺度空间分解方法进行局部特征匹配.Ei-Mehalawi 等<sup>[10]</sup>利用属性邻接图(attributed adjacency graph, AAG)表示 CAD 模型的拓扑和几何数据,并将模型存入数据库中,它在工序的检索和匹配中起了重要的作用.Cuillière 等<sup>[11]</sup>用向量方法标示几何实体,实现了 CAD 模型之间的自动比较.王飞等<sup>[12]</sup>将 CAD 模型转化为 AAG,通过图同构对模型进行局部相似性检索.皇甫中民等<sup>[13]</sup>提出基于图索引过滤机制的三维 CAD 模型局部检索方法.这些检索方法取得的成果均一定的具有通用性.近年来,对三维 CAD 模型检索技术正在朝着融合语义的方向发展,可以更好地支持

面向领域的重用,其核心思想是不仅考虑检索对象结构形状的相似性,同时也要考虑应用领域语义上的相似性<sup>[14]</sup>.在加工工艺方面,许多研究将加工特征看做是零件基本“语义”特征,为工艺重用提供全新的支持.但是,上述方法均未考虑加工特征尺寸、加工形位公差等制造信息,不能很好地支持零件制造过程设计重用;同时,也缺少三维工艺重用过程中获取指定加工特征相关工序模型.

针对上述问题,本文提出融合制造信息的三维工序模型序列重用方法,以实现已有零件工艺设计成果的有效重用,提高零件加工工艺规划效率.该方法首先利用图同构原理对工艺路线中三维工序模型序列进行优化;然后,利用子图同构对三维工序模型加工特征进行匹配,通过融合制造信息对加工特征匹配进行预处理和相似性评价,提高加工特征匹配的准确率,获取具有最相似加工特征的三维工序模型;根据三维工序模型序列优化算法,获取同构的三维工序模型序列重用于新工艺设计;最后,以实例说明融合制造信息的三维工序模型序列重用方法的可行性和合理性.

## 1 三维工序模型序列优化

### 1.1 基于 AAG 的三维工序模型拓扑结构

三维工序模型由 CAD 模型和工艺标注信息组成.当前大多数商业化 CAD 软件系统都使用 B-rep 表示法进行 CAD 模型的拓扑结构和几何信息表示.因此,可以使用相关软件系统的 API 快速提取三维工序模型的拓扑结构信息.

CAD 模型的拓扑结构表示是判断 CAD 模型相似度的基础,Joshi 等<sup>[15]</sup>提出了用 AAG 描述三维 CAD 模型的拓扑结构.三维 CAD 模型的 AAG 使用  $G(V, E, \alpha, \beta)$  表示,其中:

- (1)  $V$  表示图  $G$  的顶点集, B-rep 模型中的每一个面  $f_i$  在图  $G$  中存在唯一的顶点  $V_i$  与之对应;
- (2)  $E$  表示图  $G$  的边集,对于模型中的任意 2 个相邻面  $(f_i, f_j)$ , 图  $G$  中存在唯一的边  $E_{i,j}$  与之对应;
- (3)  $\alpha$  表示图  $G$  的顶点属性集,用于表示 B-rep 模型面的属性,包括模型面的几何类型(平面、球面、圆柱面等)以及面的边数等;
- (4)  $\beta$  表示图  $G$  的边属性集,包括边的类型等信息,同时它还记录了 CAD 模型相邻面的位置

关系, 例如, 平行、垂直或者同轴等。

根据 AAG 的定义, 可以将三维工序模型的拓扑结构使用 AAG 表示. 按照工序模型的先后顺序, 可以建立三维工艺包含的三维工序模型的 AAG 集合  $P(G) = \{G_1, G_2, \dots, G_n\}$ ; 其中,  $n$  为三维工序模型的总数。

### 1.2 基于图同构的三维工序模型序列优化

优化前的三维工序模型序列是指一条工艺路线中所有三维工序模型的集合. 完整的工艺过程可能包含热处理、表面处理、粗加工至精加工等保持待加工零件拓扑结构不变的工序. 为了提高模型检索的效率, 需要识别并去除拓扑结构相同的工序, 减少  $P(G)$  中包含的 AAG 数量, 从而提高模型检索的效率。

AAG 能够准确地描述三维工序模型的拓扑结构, 如果 2 个三维工序模型的拓扑结构相似, 则其对应的 AAG 必然存在一个公共子图  $G$ . 因此, 可以对比三维工艺包含的三维工序模型的 AAG 集合  $P(G)$  中的 AAG, 通过寻找 2 个三维工序模型对应 AAG 的最大公共子图来判断其拓扑结构的相似性。

图同构作为图论的一个核心研究点被广泛研究, 本文采用 You 等<sup>[16]</sup>提出的启发式算法计算 AAG 的最大公共子图, 并基于

$$\text{Sim}(G_1, G_2) = \frac{2|\text{mcs}(G_1, G_2)|}{|G_1| + |G_2|} \quad (1)$$

评价  $P(G)$  中的 AAG 的拓扑结构相似性. 其中,  $G_1$  和  $G_2$  为待比较的 2 个三维工序模型对应的 AAG, 函数  $\text{mcs}(G_1, G_2)$  为图  $G_1$  和  $G_2$  的最大公共子图, 函数  $|\cdot|$  表示图的顶点个数。

根据式(1)可知, 如果 2 个三维工序模型的拓扑结构相同, 即  $\text{mcs}(G_1, G_2) = G_1 = G_2$ . 此时,  $\text{Sim}(G_i, G_{i+1}) = 1$ .

因此, 可以使用三维工序模型序列优化算法来判断  $P(G)$  中 AAG 的拓扑结构相似性, 当  $\text{Sim}(G_i, G_{i+1}) = 1$  时, 去除拓扑结构相同的工序, 实现三维工序模型序列优化。

#### 算法 1. 三维工序模型序列优化算法

输入. 初始工艺序列包含的工序模型 AAG 集合  $P(G)$ .

输出. 优化后的工序模型 AAG 集合  $P(G')$ .

begin  
//初始化

```

 $P(G) = \{G_1, G_2, \dots, G_n\}, P(G) = \emptyset, i = 1;$ 
//  $P(G)$  中各三维工序模型 AAG 对比
while  $i \leq n - 1$ 
    if  $\text{Sim}(G_i, G_{i+1}) = 1$  // 若存在 AAG 同构工序模型, 则仅保留一个
        delete  $G_i$ ;
         $i = i + 1$ ;
    else
         $G_i \in P(G)$  // 将第  $i$  个工序模型 AAG 添加至  $P(G')$ ;
         $i = i + 1$ ;
    end if
end while
if  $i = n$  // 判断末位工序模型 AAG 与  $P(G')$  中的工序模型是否同构
    if  $\text{Sim}(G_i, G_{i+1}) \neq 1$ 
         $G_i \in P(G)$  // 将第  $n$  个工序模型 AAG 添加至  $P(G')$ ;
    end if
end if
end
    
```

通过三维工序模型序列优化算法, 可以将同构工序模型合并, 减少三维工艺路线中的工序模型数提高搜索效率. 经过算法优化后的三维工序模型实例如图 1 所示。

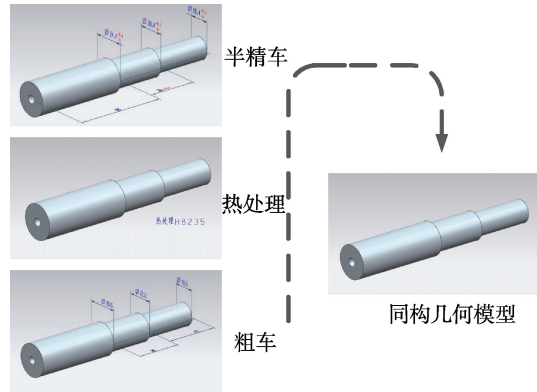


图 1 三维工序模型优化

图 1 中所示某型轴的加工过程包含的粗车、热处理和半精车等 3 个工序模型由于拓扑结构相同, 将由一个同构几何模型表示, 从而减少该工艺路线包含的工序模型数量; 在后续模型检索过程中, 仅对同构几何模型进行拓扑比对, 将有效地提高比对效率。

通过对每一条工艺路线进行模型序列优化, 能够有效地减少三维工序模型的数量, 即待检索的目标模型将减少. 优化后的效率提高程度与

减少的模型数量相关, 效率提高程度公式为

效率提高程度  $\approx$  模型总数量 / (模型总数量 - 删除的模型数量).

在优化过程中, 拓扑一致的相邻工序模型所包含的“公差”、“表面粗糙度”等制造信息, 将以属性的形式追加到保留的三维工序模型中, 保证三维工艺路线中工艺信息的完整性.

## 2 三维工序模型局部结构检索

### 2.1 基于子图同构的三维工序模型制造特征匹配

工艺设计过程中, 工艺人员更多地关注于零件的某一制造特征, 希望能够检索得到具备该制造特征的三维工序模型, 重用三维工序模型中该制造特征相关工艺设计知识. 为此, 需要根据设计人员指定的制造特征, 检索并返回包含该制造特征的三维工序模型. 将设计人员指定的制造特征使用 AAG 表示, 形成局部结构“小图”, 则制造特征的检索过程转换为在三维工序模型形成的 AAG(大图)中寻找小图的过程, 即子图同构问题, 如图 2<sup>[14]</sup>所示.

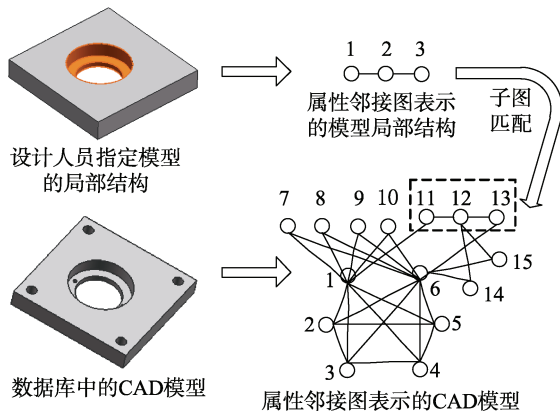


图 2 子图同构<sup>[14]</sup>

作为一个 NP 完全问题, 子图同构的判断问题大多采用设定启发条件, 尽可能地减小搜索空间, 从而提高算法的求解效率. 例如, SD 算法<sup>[17]</sup>和 Ullmann 算法<sup>[18]</sup>等. Ullmann 算法根据顶点的相似性降低搜索空间, 加速图的匹配过程, 算法基本原理如下:

使用  $G_a(V_a, E_a)$  表示用户指定的制造特征结构,  $G_b(V_b, E_b)$  表示待检索三维工序模型. 假设图  $G_a$  的顶点个数为  $n$ ,  $G_b$  的顶点个数为  $m$ , 建立映射矩阵  $M_{n \times m}$ .  $M$  为布尔矩阵, 如果  $G_a$  的第  $i$  个顶点  $v_a$  与  $G_b$  的第  $j$  个顶点  $v_b$  匹配, 则元素  $m_{ij} = 1$ ; 否

则  $m_{ij} = 0$ . 如果存在映射矩阵  $M$  满足以下 2 个条件: (1) 每一行有且只有一个元素值为 1; (2) 每一列至多只有一个元素值为 1; 则  $G_a$  与  $G_b$  子图同构, 且矩阵  $M$  反映图  $G_a$  与  $G_b$  的同构关系.

#### 2.1.1 映射矩阵初始化

为了降低搜索空间的复杂度, 提高图的匹配效率, 需要利用已有条件对映射矩阵  $M$  进行初始化, 将其元素尽可能多地置零. Ullmann 算法根据顶点的度的相似性降低搜索空间, 由于 AAG 的顶点表示三维模型的面, 因此可以使用三维模型的面属性和面与面间关系将映射矩阵  $M$  中的元素进一步置零. 基于 AAG 的  $G(V, E, \alpha, \beta)$  表示, 在 Ullmann 算法对映射矩阵  $M$  进行初始化的基础上, 增加如下初始化规则:

(1) 顶点类型. 只有相同类型的顶点, 即相同类型的面组成的子图同构才具有实际意义. 例如, 平面和弧面对应的顶点.

(2) 边的类型. 2 个面具有相同类型的边, 是它们相似的基础. 例如, 具有圆弧边和仅具有直线边的平面不可能相似.

根据上述规则, 在进行子图匹配运算之前, 可以将映射矩阵  $M$  中的元素尽可能多地置零, 从而提高运算效率.

#### 2.1.2 制造特征匹配算法

在映射矩阵  $M$  初始化之后, 使用 Ullmann 算法进行子图匹配搜索, 搜索过程如下:

Step1. 初始化辅助顶点集合  $V_1 = \emptyset$ ,  $V_2 = \emptyset$ .

Step2. 搜索映射矩阵  $M$  的第  $i$  行, 查找值为 1 的第  $j$  列; 将顶点  $v_a$  ( $v_a \in G_a$ ) 和顶点  $v_b$  ( $v_b \in G_b$ ) 分别加入到顶点集合  $V_1$  和  $V_2$  中.

Step3. 根据顶点间约束关系, 判断顶点集合  $V_1$  组成的子图与  $V_2$  组成的子图是否同构, 以确定顶点  $v_a$  和  $v_b$  是否匹配.

Step4. 若顶点  $v_a$  和  $v_b$  匹配, 令  $i = i + 1$ , 对映射矩阵  $M$  的下一行进行搜索; 否则, 在  $V_1$  和  $V_2$  中删除顶点  $v_a$  和  $v_b$ , 在第  $i$  行继续搜索值为 1 的列; 若在第  $i$  行未能找到有效的顶点匹配, 令  $i = i - 1$ , 在  $V_1$  和  $V_2$  中删除上一行记录的匹配顶点, 并重新查找与  $v_a$  匹配的顶点.

Step5. 迭代上述步骤, 直至映射矩阵  $M$  最后一行.

使用上述匹配算法, 能够判断某一个三维工序模型中是否存在设计人员指定的同类型制造特征.

### 2.2 融合制造信息的特征相似性评价

三维工序模型的几何拓扑相似性是确定三维工序模型是否具有重用价值的重要影响因素,

但是三维工艺重用不仅受到几何因素的影响, 还需要考虑材料、公差、表面粗糙度等制造特征的影响。因此, 建立制造语义识别过程, 根据制造语义层描述的零件材料、特征类型和相关技术要求等制造信息, 提高三维工序模型检索的效率和准确度。

### 2.2.1 材料类型

材料属性对零件加工工艺的选择有重大影响, 不同材料属性下, 几何相同的制造特征可能需要不同的加工工艺。因此, 材料类型对于三维工序模型是否具有重用价值具有决定作用。若待加工制造特征材料与三维工序模型的材料属性不同, 即使三维工序模型中存在几何相同的制造特征, 也不具备工艺重用价值。

三维工艺序列适用的零件材料信息依赖于三维工序模型, 三维工序模型的材料信息可以通过三维建模软件的相关 API 获得。假定待比较的制造特征  $i$  和三维工序模型  $j$  的材料信息为  $M_i$  和  $M_j$ , 制造特征与三维工序模型的材料相似度为

$$S_M = \begin{cases} 1, & f(M_i) = f(M_j) \\ 0, & f(M_i) \neq f(M_j) \end{cases}$$

其中, 函数  $f$  返回材料名称。若制造特征与三维工序模型材料相同, 则  $S_M = 1$ , 可以继续后续几何拓扑和制造语义的对比; 否则  $S_M = 0$ , 即此三维工艺序列不存在参考价值。

### 2.2.2 特征类型

当前的三维 CAD 模型多采用特征建模方式构建, 因此可以使用三维建模软件相关 API 获取组成三维工序模型的特征类型。只有特征类型相同的制造特征, 才有可能采用相同的工艺; 而制造特征类型相同, 并不能确定制造特征的几何结构相同。例如, 同为孔特征, 通孔和沉孔的几何拓扑就存在差异性, 采用的工艺也不相同。

综上所述, 特征类型的一致性是制造工艺重用的前提, 也是提高制造特征检索的有效手段。如果三维工序模型中存在与待加工制造特征同类型的特征, 可以进一步对制造特征的几何相似性进行比较, 否则可以直接跳过该三维工序模型。假定待比较的制造特征  $i$  的特征类型为  $F_i$ , 工序模型  $j$  包含的特征类型为  $F_{j,k}$ , 三维工序模型中存在与待加工制造特征相同类型特征的可能性为  $S_T$ , 则有

$$S_T = \begin{cases} 1, & \exists t(F_{j,k}) = t(F_i) \\ 0, & t(F_{j,k}) \neq t(F_i) \end{cases}$$

其中,  $1 \leq k \leq$  工序模型  $j$  包含的特征数。

通过函数  $S_T$  可得, 若三维工序模型中存在与待加工制造特征相同类型的特征, 则  $S_T = 1$ , 可以继续后续几何拓扑和制造语义的对比; 否则,  $S_T = 0$ , 即此三维工序模型不存在参考价值。

### 2.2.3 公差

公差等级是工艺设计过程中必须考虑的因素, 同一制造特征, 不同的公差等级要求下可能采用不同的工艺方法。因此, 公差等级对于三维工序模型中的制造特征是否具有重用价值具有重要参考价值。

三维工序模型中, 公差等级以三维标注的形式依赖于制造特征。因此, 公差等级的比较在搜索到几何相似的制造特征后进行。假定待比较的制造特征  $i$  和  $j$  的公差等级分别为  $I_i$  和  $I_j$ , 制造特征的公差等级相似度为

$$S_R = 1 - \frac{|I_i - I_j|}{\max(I_i, I_j)}$$

### 2.2.4 表面粗糙度

与公差等级相似, 表面粗糙度也是工艺设计过程中必须考虑的因素之一, 对加工工艺的选择有重要的影响。因此, 表面粗糙度的相似性对于三维工序模型中的制造特征是否具有重用价值同样具有重要参考价值。

三维工序模型中, 表面粗糙度以三维标注的形式依赖于制造特征。因此, 表面粗糙度的比较在搜索到几何相似的制造特征后进行。假定待比较的制造特征  $i$  和  $j$  的表面粗糙度最小值分别为  $P_i$  和  $P_j$ , 待比较制造特征的表面粗糙度相似度为

$$S_A = 1 - \frac{|P_i - P_j|}{\max(P_i, P_j)}$$

### 2.2.5 刀具适用性

受到制造特征几何类型的影响, 几何类型相同的制造特征的加工过程使用的刀具具有相似性。因此可以使用制造特征加工过程采用的刀具的适用性的相似度  $S_O$  作为工艺重用的参考。

刀具适用性包括制造特征加工过程中刀具类型的选择与刀具尺寸的确定, 与制造特征的几何类型紧密相关, 如型腔类型制造特征的刀具适用性取决于理论刀具半径范围, 孔类型制造特征取决于径深比。因此, 刀具适用性的相似度计算需要根据制造特征类型的不同分别进行。

### (1) 型腔类特征

型腔类型特征主要包括型腔、槽和平面等。经过三维工序模型序列优化过程，当同一特征的粗、精加工过程处于相邻工序模型时，可能仅保留精加工过程三维工序模型。此时，需要读取粗加工过程工序模型中的刀具信息，进而使用中轴转换法<sup>[9]</sup>进行型腔类型制造特征的理论刀具范围计算。如果使用  $D_1$  和  $D_2$  分别表示 2 个待比较制造特征粗加工过程的刀具半径选择范围，使用  $R_1$  和  $R_2$  表示 2 个待比较制造特征精加工过程可用的最大刀具半径，则 2 个型腔类型制造特征的刀具适用性相似度公式为

$$S_O(T_1) = \frac{0.7 \times |D_1 \cap D_2|}{\max(D_1, D_2)} + \left[ 0.3 - \frac{0.3 \times |R_1 - R_2|}{\max(R_1, R_2)} \right].$$

### (2) 孔类特征

孔类特征的刀具适用性取决于径深比，使用  $L_1$  和  $L_2$  分别表示 2 个待比较孔类制造特征的径深比，则刀具适用性相似度计算公式为

$$S_O(T_2) = 1 - \frac{|L_1 - L_2|}{\max(L_1, L_2)}.$$

### (3) 自由曲面特征

自由曲面特征的刀具适用性取决于自由曲面的曲率半径，使用  $C_1$  和  $C_2$  分别表示 2 个待比较自由曲面制造特征的曲率半径范围，则刀具适用性相似度计算公式为

$$S_O(T_3) = \frac{|C_1 \cap C_2|}{\max(C_1, C_2)}.$$

综合上述分析，2 个待比较制造特征  $F_i$  和  $F_j$  的制造语义层相似度计算公式为

$$f(F_i, F_j) = \begin{cases} \sum_{n \in D} \omega_n \times S_n, & S_M = 1 \wedge S_T = 1 \\ 0, & S_M = 0 \vee S_T = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中， $\omega_n$  为各分量的权重系数； $\sum_{n \in D} \omega_n = 1$ ； $D = \{R, A, O\}$ 。

由式(2)可见，当材料类型  $S_M$  或特征类型  $S_T$  不同时， $f(F_i, F_j) = 0$ 。即若待搜索的三维工艺序列中不存在具有参考价值的制造特征，则无需进行三维工序模型制造特征匹配和其他制造信息的比较，从而提高特征检索效率。

## 3 三维工序模型序列重用

三维工序模型序列重用过程分为检索和重用 2 个阶段。在检索阶段，首先，根据材料类型和特征类型进行初步判断。如果初步判断不通过，则直接跳过检索对象，从而提高检索效率。其次，基于子图同构进行三维工序模型制造特征匹配。若无匹配制造特征，则跳过检索对象。最后，根据制造语义信息对检索到的制造特征进行评价，以获取具有最相似制造特征的三维工序模型。在重用阶段，根据三维工序模型序列优化算法，获取同构的三维工序模型序列用于新工艺设计。

基于三维工序模型序列重用的 2 个阶段，提出三维工序模型序列重用的基本思路：

Step1. 指定制造特征。

Step2. 判断三维工艺对象的材料类型。

Step3. 判断优化后的三维工艺序列中是否有包含待检索制造特征同类型特征。

Step4. 进行制造特征匹配，精确查找三维工艺序列中的同类型制造特征。

Step5. 根据制造语义信息对检索到的三维工艺模型中的制造特征进行评价。

Step6. 用户选定包含相似制造特征的三维工序模型。

Step7. 根据三维工序模型序列优化算法，获取三维工艺中的同构三维工序模型序列。

Step8. 提取同构三维工序模型序列中的制造信息，用于新工艺设计。

上述三维工序模型序列重用的三维工序模型检索阶段实现见算法 2。

### 算法 2. 三维工序模型检索算法

输入. 制造信息集合  $I = \{M, T, R, A, O\}$ ，用户指定制造特征的制造信息图  $G_a$ ，用户指定制造特征的 AAG。

输出. 已排序的工序模型集合  $P_R$ 。

begin

初始化三维工艺集合  $P = \{P_j | 0 < j \leq n\}$ ，已进行三维工序模型序列优化的三维工艺  $P_j \in P$ ，三维工序模型  $P_{pj} \in P_j$ ，制造特征  $F_{pj} \in P_{pj}$ ；

建立工序模型集合  $P_R$ ，并初始化为空集；

//开始搜索

while  $P_j \in P, 0 < j \leq n$

//使用制造特征中的材料类型和特征类型信息进行初步搜索

if  $f(M) = f(M_{pj})$

```

while  $P_{pj} \in P_j$ 
  if 存在特征  $F_{pj}$  使  $t(F_{pj}) = t(F)$ 
    while  $F_{pj} \in P_{pj}$ 
      // 基于子图同构进行制造特征匹配
      if 存在匹配特征
        将工序模型  $P_{pj}$  添加至集合  $P_R$  中;
        // 融合制造语义进行特征相似性
        评价
        计算  $f(F, F_{pj}) = \sum \omega_n \times S_n, n \in \{R, A, O\}$ ;
        根据  $f(F, F_{pj})$  的值对集合  $P_R$  中的工序
        模型进行排序;
      end if
    end while
  else
    // 若不存在同类型特征, 则进入一下工艺序列继续
    搜索
     $j = j + 1$ ;
    break
  end if
end while
else
  // 若材料类型不同, 则进入一下工艺序列继续搜索
   $j = j + 1$ ;
  end if
end while
end

```

使用三维工序模型检索算法, 可以根据用户指定的制造特征获取具有同类型制造特征的三维工序模型集合  $P_R$ .  $P_R$  中的三维工序模型来源于不同的三维工艺, 在用户选定所需的三维工序模型后, 使用算法 3 提取三维工序模型序列.

算法 3. 三维工序模型序列提取算法

输入. 三维工序模型  $P$ , 用户选择的三维工序模型.

输出. 三维工序模型序列  $P_L$ .

```

begin
  初始化三维工序模型  $P$  所属三维工艺包含的三维
  工序模型序列  $P = \{P_r | r = 1, 2, \dots, n\}$ , 优化后的三维工序
  模型序列  $P' = \{P_s | s = 1, 2, \dots, m\}$ ;

```

建立位置变量  $int k, l$ ; 建立三维工序模型重用序列集合  $P_L$ , 并初始化为空集;

// 在  $P'$  中搜索  $P$  所处位置

```

for each  $P_s \in P', s = 1, 2, \dots, m$ 

```

```

  if  $P = P_s$ 

```

// 在  $P$  中搜索  $P_s$  和  $P_{s-1}$  所处位置

```

    for each  $P_r \in P, r = 1, 2, \dots, n$ 

```

// 确定前置非同构工序在工序模型

序列中的位置标记

```

    if  $P_r = P_{s-1}$ 
       $l = r$ ;
    end if
    // 确定  $P$  在工序模型序列中的位置标记, 显然  $l < k$ 
    if  $P_r = P_s$ 
       $k = r$ ;
    end if
  end if
end if
end
// 提取三维工序模型序列
for each  $P_r \in P, r = 1, 2, \dots, n$ 
  if  $l < r \leq k$ 
    将  $P_r$  添加至集合  $P_L$  中;
  end if
end
end
end

```

通过算法 3 可以获取具有用户指定的制造特征的三维工序模型序列. 通过 API 接口获取三维工序模型序列中类似制造特征的工艺信息, 并推送至工艺设计人员<sup>[19]</sup>, 用于三维工艺设计.

#### 4 本文方法可行性验证

以图 3 所示某型轴零件为例, 对本文方法进行验证, 验证三维工艺模型库为本课题组积累三维工艺模型建库. 该型轴零件所用材料为 45 钢, 部分尺寸信息及表面粗糙度信息如图 3 所示.

本文方法适用于零件的局部特征, 如图 4 所示,

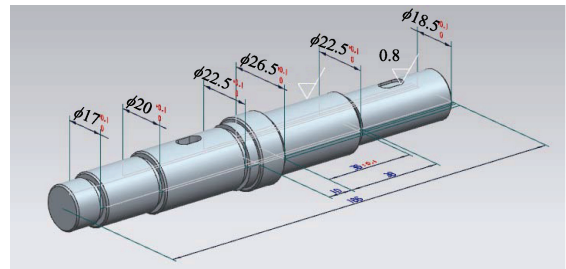


图 3 某型轴零件

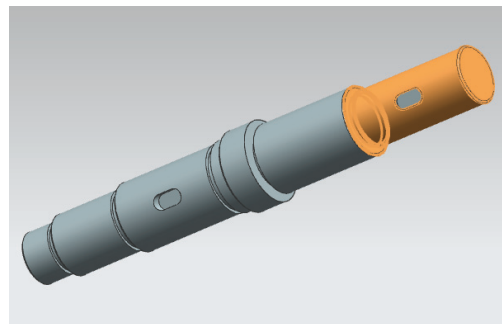


图 4 指定局部结构 1

高亮部分为选中的制造特征. 首先使三维工序模型检索算法获取包含同构制造特征的三维工序模型,

并融合制造语义计算其相似度, 按照  $f(F_i, F_j)$  的大小进行排序, 结果如表 1 所示.

表 1 局部结构检索实例 1 相似度排序

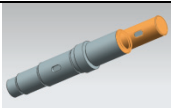
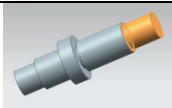
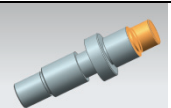
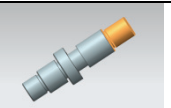
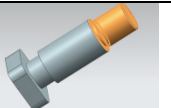
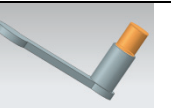
实例 1	返回模型				
					
相似度	0.9613	0.9345	0.9322	0.9008	0.8986

表 1 所示的检索结果展示三维工序模型中制造特征与指定制造特征的相似度排序. 模型检索结果基于相似度的值由高到低进行排序, 此处展示为相似度排序前 5 的检索结果. 由于用于搜索的制造特征已属于零件级特征, 其搜索结果也多数来源于三维工艺路线的末位工序模型, 即零件模型. 因此, 可以直接获取相似度较高的制造特征所属三维工艺, 进行工艺设计参考和重用. 同时, 也可以执行三维工序模型序列重用算法, 获取相关的三维工序模型序列, 用于设计参考和重用.

此外, 本文方法也适用于工序模型的局部特征设计重用. 假定设计人员在工艺设计过程中已确定后续工序的加工目标, 并建立三维模型, 此时, 可以使用本文方法获取相似加工工序模型序列指导三维工艺设计. 假定设计人员建立

的目标三维模型如图 5 所示, 高亮部分为选中的制造特征.

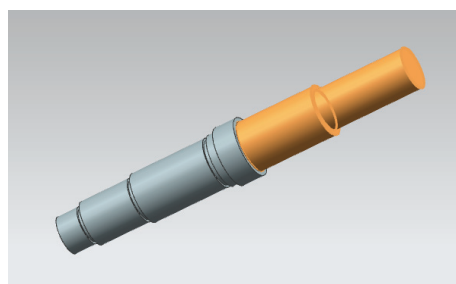
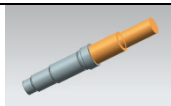
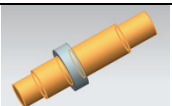
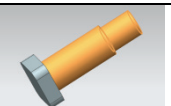
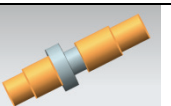
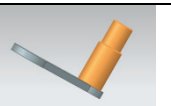
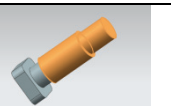


图 5 指定局部结构 2

使用三维工序模型检索算法获取包含同构制造特征的三维工序模型, 并融合制造语义计算其相似度, 按照  $f(F_i, F_j)$  的大小进行排序, 排序前 5 的结果如表 2 所示. 根据搜索排序结果和实际应用需求, 选取重用对象. 根据选择结果, 执行三维工

表 2 局部结构检索实例 2 相似度排序

实例 2	返回模型				
					
相似度	0.9789	0.9671	0.9362	0.9225	0.9146

序模型序列重用算法, 获取相关的三维工序模型序列. 如图 6 所示, 检索到的直接结果仅仅是同构几何模型, 即基于图同构的三维工序模型序列优化过程得到的优化后模型序列中的单个模型. 为了实现工艺序列的重用, 可以基于此同构几何模型得到对应的三维工序模型序列.

三维工序模型序列的获取过程是三维工序模型序列优化过程的逆过程, 获取的三维工序模型序列包含 1 个或多个三维工序模型, 每个模型中都包含与检索制造特征同构的制造特征及其详细工艺设计信息, 可用于工艺设计参考和重用.

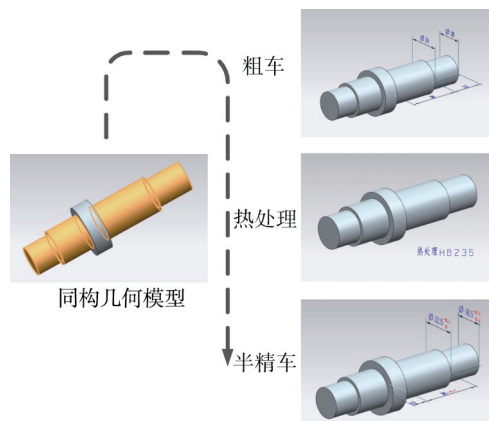


图 6 获取可重用三维工序模型序列

## 5 结 语

本文针对三维工艺重用过程中难以获取指定制造特征相关工序模型的问题,提出融合制造语义的三维工序模型序列重用方法.首先,从三维工序模型的拓扑结构出发,基于图同构的原理进行工艺路线中三维工序模型序列的优化,减少搜索空间.其次,将待检索制造特征的拓扑结构使用子图表示,基于子图同构原理进行制造特征的匹配.并融合制造语义,进行特征匹配的预处理和相似性评价,提高特征匹配的效率和准确率.最后,设计融合制造语义的三维工序模型检索算法和三维工序模型序列重用算法,并进行算法的有效性验证.实验结果表明,融合制造语义的三维工序模型序列重用方法能够准确、有效地获取包含指定制造特征同构特征的三维工序模型序列,为指定制造特征的三维工艺设计提供完整的工艺信息,具有良好的应用效果.

## 参考文献(References):

- [1] Liu Changqing. The key technologies of intelligent machining based on dynamic machining feature for aerospace structural parts[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014(in Chinese)  
(刘长青. 基于动态加工特征的航空结构件智能加工关键技术[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014)
- [2] Bepalov D, Regli W C, Shokoufandeh A. Local feature extraction and matching partial objects[J]. Computer Aided Design, 2006, 38(9): 1020-1037
- [3] Márkus A, Vánca J, Horváth M. Process planning by retrieval and adaptation[J]. Computers in Industry, 1997, 33(1): 47-60
- [4] Humm B, Schulz C, Radtke M, *et al.* A system for case-based process planning[J]. Computers in Industry, 1991, 17(2/3): 169-180
- [5] Yan Jian, Chen Youling, Liu Wenke. Research on approach of part process case reusing based on ontology mapping[J]. Application Research of Computers, 2012, 29(1): 177-180(in Chinese)  
(严键, 陈友玲, 刘文科. 基于本体映射的零件工艺实例重用方法研究[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(1): 177-180)
- [6] Liao T W. Classification and coding approaches to part family formation under a fuzzy environment[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2001, 122(3): 425-441
- [7] Li Shuangyue, Long Hongneng, Yin Guofu, *et al.* Manufacturing process resource modeling & retrieval method based on features[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13(6): 1061-1065+1070(in Chinese)  
(李双跃, 龙红能, 殷国富, 等. 基于特征的制造工艺资源建模与检索方法研究[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(6): 1061-1065+1070)
- [8] Grabowik C, Knosala R. The method of knowledge representation for a CAPP system[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 133(1/2): 90-98
- [9] Chen Z C, Fu Q. An optimal approach to multiple tool selection and their numerical control path generation for aggressive rough machining of pockets with free-form boundaries[J]. Computer-Aided Design, 2011, 43(6): 651-663
- [10] El-Mehalawi M, Miller R A. A database system of mechanical components based on geometric and topological similarity. Part II: indexing, retrieval, matching, and similarity assessment[J]. Computer-Aided Design, 2003, 35: 95-105
- [11] Cuillière J C, François V, Souaissa K, *et al.* Automatic comparison and remeshing applied to CAD model modification[J]. Computer-Aided Design, 2011, 43(12): 1545-1560
- [12] Wang Fei, Zhang Shusheng, Bai Xiaoliang, *et al.* Local matching of 3D CAD models based on subgraph isomorphism[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2008, 20(8): 1078-1084(in Chinese)  
(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)
- [13] Huangfu Zhongmin, Zhang Shusheng. Partial retrieval method of 3D CAD models based on graph indexing and filtering mechanism[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(7): 1679-1689(in Chinese)  
(皇甫中民, 张树生. 基于图索引过滤机制的三维 CAD 模型局部检索[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(7): 1679-1689)
- [14] Zhang Xin, Mo Rong, Gong Zhongwei, *et al.* Automatic semantic tagging of CAD models for retrieval[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2010, 22(12): 2162-2167(in Chinese)  
(张欣, 莫蓉, 宫中伟, 等. CAD 模型自动语义标注[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2010, 22(12): 2162-2167)
- [15] 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
- [16] You C F, Tsai Y L. 3D solid model retrieval for engineering reuse based on local feature correspondence[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 46(5-8): 649-661
- [17] Schmidt D C, Druffel L E. A fast backtracking algorithm to test directed graphs for isomorphism using distance matrices[J]. Journal of the ACM, 1976, 23(3): 433-445
- [18] Ullmann J R. An algorithm for subgraph isomorphism[J]. Journal of the ACM, 1976, 23(1): 31-42
- [19] Shao Y L, Liu Y S, Li C G. Intermediate model based efficient and integrated multidisciplinary simulation data visualization for simulation information reuse[J]. Advances in Engineering Software, 2015, 90: 138-151