

DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201810029



# 三维机加工工序模型的变更与维护方法

乔虎<sup>1</sup>, 何俊<sup>1</sup>, 徐昭晖<sup>1</sup>, 向颖<sup>2</sup>

(1. 西安工业大学 机电工程学院, 陕西 西安 710021;  
2. 陕西科技大学 机电工程学院, 陕西 西安 710021)

**摘要:** 针对三维机加工工序模型在变更过程中数据维护困难的问题,提出一种基于变更传播模型和工序模型信息的三维工序模型变更与维护方法.首先,通过建立工艺路线中各加工特征间的设计结构矩阵(DSM),分析各加工特征可能的传播路径;然后,以分析所得路径为核心,对可能受影响的加工特征、加工特征所属工序模型等信息进行结构化存储;最后,结合工艺路线中各工序的工序模型信息,提出添加、删除、修改加工特征的工序模型变更和维护算法.实例验证表明:该方法可有效地进行三维机加工工序模型的变更与维护.

**关键词:** 三维工序模型;变更传播模型;加工特征;设计结构矩阵

**中图分类号:** TP 391      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2019)04-0457-07

## Change and Maintenance Method of 3D Machining Process Model

QIAO Hu<sup>1</sup>, HE Jun<sup>1</sup>, XU Zhaohui<sup>1</sup>, XIANG Ying<sup>2</sup>

(1. School of Mechatronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;  
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of difficult data maintenance in the process of the 3D machining process model, a method of change and maintenance of 3D process model based on change propagation model and process model information was proposed. First, by established the design structure matrix (DSM) among each machining feature in the process route, the possible propagation path of machining characteristics was analyzed. Second, taken the paths of analysis as the core, the affected information, for example the information of processing features and process models that may be affected, are structured storage combined with the process model information of each process. Finally, a process model change and maintenance algorithm to add, delete and modify machining feature is proposed based on process model information. The examples show that this method can effectively change and maintain the 3D machining process model.

**Keywords:** 3D process model; change propagation model; machining feature; design structure matrix

基于模型的定义(MBD)技术旨在通过三维模型为产品设计与制造信息提供依据和载体<sup>[1-2]</sup>,其中,应用MBD技术进行机械加工工艺设计和数控编程是当前研究的热点<sup>[3-10]</sup>.工序模型变更传播是指对某一工序模型进行修改后,该工序模型的更改会传播到后续的工序模型中<sup>[11-12]</sup>.通过研究变更因素之间的关系,构建数学模型是预测变更路径的基础<sup>[13-14]</sup>.目前,这方面应用较广的数学模型主要有层次分析模型<sup>[15]</sup>、多目标决策模型<sup>[16]</sup>、设计结构矩阵(DSM)模型<sup>[17]</sup>等.设计结构矩阵在描述多重组成关系中具有较为突出的优势<sup>[17-21]</sup>,它可以清晰地表现设计因素之间的耦合、制约等复杂关系.因此,本文首先通过建

**收稿日期:** 2018-10-15

**通信作者:** 向颖(1987-),女,讲师,博士,主要从事智能设计与智能制造的研究. E-mail:yingcara@hotmail.com.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51705392);陕西省创新人才推进计划-青年科技新星项目(2019KJXX-060);陕西省软科学研究计划资助项目(2019KRM152, 2019KRM203)

立各加工特征间的设计结构矩阵,对其进行聚类分析,获取各加工特征可能的传播路径.然后,基于传播路径,对路径中的机加工序模型、加工特征等信息进行结构化建模,形成三维工序模型变更与维护的数据基础.最后,提出添加、删除、修改加工特征的工序模型变更和维护算法,并进行实例验证.

1 基础模型的建立

1.1 工序模型变更传播的路径分析

1.1.1 工序模型变更 DSM 的建立 在工序模型变更过程中,后期工序模型中的加工特征在前期工序模型的加工特征更改的基础上获得,即工序模型的加工特征间存在有向的关联关系.工序模型变更,如图 1 所示.首先,通过外轮廓加工和扩孔操作,对工序模型 1 的基础特征 1.1~1.5 进行加工,形成新的特征 2.1~2.5(图 1(b));然后,在特征 2.1 的基础上,通过开槽工步形成特征 3.1,3.2,通过打孔工步形成特征 3.3(图 1(c));最后,在特征 2.1 的基础上进行开异型槽工序,形成新特征 4.1(图 1(d)).

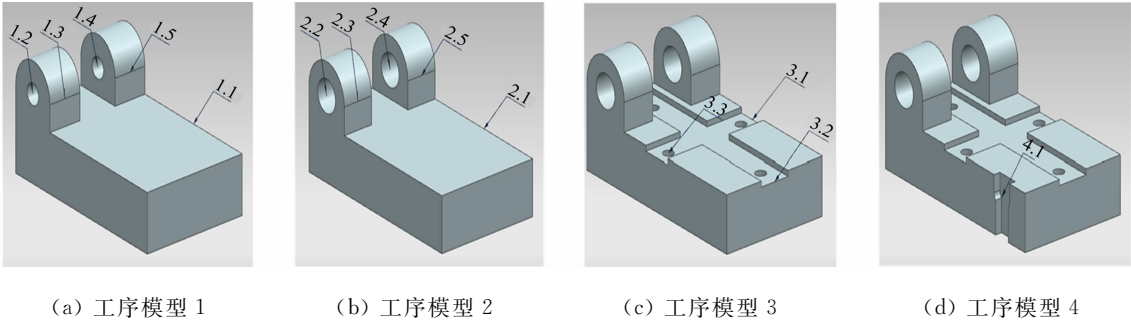


图 1 工序模型变更  
Fig.1 Process model change

工序间加工特征关联关系共有 14 个(图 1),用  $14 \times 14$  的矩阵表示. DSM 中,若某一特征  $i$  基于特征  $j$  构建,则令方阵中的第  $i$  行第  $j$  列的元素为 1;否则,该元素为 0,其中,  $i \neq j$ . 得到的设计结构矩阵,即为该工序模型变更设计结构矩阵,如图 2 所示.

1.1.2 基于 DSM 聚类的变更传播路径分析 采用文献 [16] 中的算法,得到 DSM 聚类结果,如图 3 所示. 由图 3 可知:经过聚类之后,DSM 中产生了若干大小不同的子块,每个子块中包含的加工特征的变更只会影响其对应子块中的元素. 由于不同子块的加工特征不存在耦合关系,故不同子块之间不会发生变更传播. 因此,分析或关联子块中蕴含的加工特征成为核心问题.

根据 DSM 聚类结果,得到若干个无关的加工特征关联子图,如图 4 所示. 图 4 中:对加工特征变更

	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	3.1	3.2	3.3	4.1
1.1	-													
1.2		-												
1.3			-											
1.4				-										
1.5					-									
2.1	1					-								
2.2		1				-								
2.3			1			-								
2.4				1										
2.5					1					-				
3.1						1					-			
3.2						1						-		
3.3											1	1	-	
4.1						1								-

图 2 工序模型变更 DSM  
Fig.2 Process model change DSM

	1.1	2.1	3.1	3.2	3.3	4.1	1.2	2.2	1.3	2.3	1.4	2.4	1.5	2.5
1.1	-													
2.1	1	-												
3.1		1	-											
3.2		1		-										
3.3			1	1	-									
4.1		1				-								
1.2							-							
2.2							1	-						
1.3									-					
2.3								1	-					
1.4										-				
2.4										1	-			
1.5												-		
2.5												1	-	

图 3 DSM 聚类结果  
Fig.3 DSM clustering results

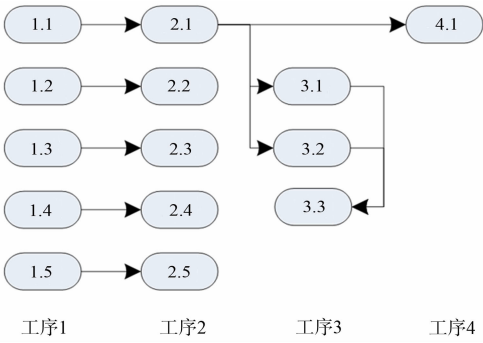


图 4 特征间关联图  
Fig.4 Correlation graph between features

的可能影响路径和影响范围进行标示。

1.2 工序变更传播模型的建立

根据相似零件结构有相似工艺准则,相似的加工特征可能使用相同的加工方法<sup>[22]</sup>。根据加工特征的类别,可以确定已有工序模型中是否具有与新加工特征同一类别的加工特征。若存在同一类别的加工特征,则优先将新加工特征添加到该工序模型中;否则,需要工艺人员确定新加工特征所属工序模型。

建立工序模型变更传播模型,记录工序变更发生时的加工特征的变化路径和影响范围,指导加工特征的增加、删除、修改操作。DSM 聚类分析结果或对应的加工特征关联子图是工序变更传播模型的基础,在这基础上,整合各加工特征所属工序模型及加工特征类型的信息,以形式化进行表示,便于存储和应用。变更传播模型的基本结构,如图 5 所示。图 5 中:第 1 层节点 Description 为根节点,其他节点均为其子节点;第 2 层节点包括 ProcessName(存储该变更传播模型所属的工艺名称),PathNum(分类标记指示变更路径的编号,即所基于的 DSM 子块或加工特征子图)和 Nodes(记录该变更路径所包含的节点信息);第 3 层节点包括 ParentID(存储加工特征引用的加工特征的 ID),FeatureID(存储加工特征的 ID),FeatureType(记录加工特征所属的特征类型信息),ProcedureName(记录加工特征所属的工序模型信息)。

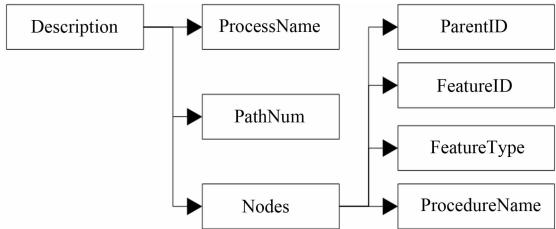


图 5 变更传播模型的基本结构

Fig. 5 Change basic structure of propagation model

1.3 三维工序模型信息的建模

变更传播模型虽然包含加工特征与所属三维工序模型等部分的三维工序模型信息,但是不包含工艺标注和未发生变化的加工特征等其他信息。三维工序模型中不仅包含新添加的加工特征,还包含已有的、未发生变化的加工特征,即已完成加工特征。已完成加工特征在当前工序模型中不进行工艺标注,但当在工序模型中添加、删除或修改加工特征时,可能对已完成的加工特征产生影响。因此,在建立三维工序模型信息结构时,需要包含完整的加工特征信息、组成加工特征的几何元素信息和工艺标注信息。

综上所述,建立三维工序模型信息的组织结构,将工艺路线中的三维工序模型信息按照该结构进行组织规范,结合变更传播模型,成为三维机加工工序模型变更传播与维护的基本信息来源。

三维工序模型信息包括工序名、加工特征、组成加工特征的几何元素和工艺标注等,形式化表示这些信息,形成三维工序模型信息组织结构,如图 6 所示。图 6 中:第 1 层节点 Description 为根节点;第 2 层节点包括 ProcessName, ProcedureName, Features(描述该工序模型包含的加工特征信息);第 3 层节点包括 FeatureID, GeoElements(存储组成加工特征的几何元素信息), Annotations(对加工特征进行工艺标注);第 4 层节点包括 AnnoID(工艺标注的唯一标识), AttachedEle(记录该工艺标注所依附的几何元素)。

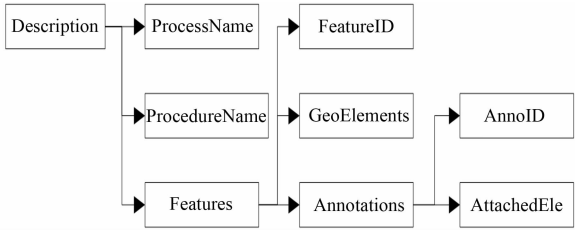


图 6 三维工序模型信息组织结构

Fig. 6 Information organization structure of 3D process model

2 三维工序模型变更与数据维护

2.1 加工特征算法的修改

加工特征算法的修改有以下 5 个步骤。

步骤 1 打开工序模型  $i$ ,对加工特征  $k$  进行修改。

步骤 2 在变更传播模型中,查找修改的加工特征  $k$ ,确定其所属加工特征关联子图 PathNum。

步骤 3 根据 PathNum 记录的加工特征间关联关系,确定依赖于加工特征  $k$  的  $n$  个加工特征。

步骤 4 修改加工特征  $k$  后,重新建立工序模型  $i$  的工序模型信息,并与原工序模型信息进行对比,将差异信息(不包含 Annotations)添加到数组 ChangedFeatur s(一个存储变化信息的临时数组)。根据 ChangedFeatures 存储的信息,更新  $i$  之后所有工序模型的对应信息和三维模型。

步骤 5 依赖加工特征  $k$  的第  $j$  ( $1 \leq j \leq n$ ) 个加工特征进行更新,若  $j < n$ ,令  $k = j$ ,转至步骤 4。

2.2 加工特征算法的删除

由于加工特征的关联性,删除加工特征的难点在于删除后的相关加工特征的处理.按照删除加工特征在加工特征关联子图中的位置,删除后的后续加工特征的处理可以分为删除后重新链接前、后加工特征和删除后续所有加工特征 2 种方式;此外,若删除加工后,导致某工序模型与前续工序模型相同,则该工序模型不存在新的加工特征,需要删除该工序模型.加工特征算法的删除有以下 8 个步骤.

- 步骤 1 打开工序模型,删除加工特征  $k$ .
- 步骤 2 查找待删除加工特征  $k$ ,确定其所属加工特征关联子图 PathNum.
- 步骤 3 建立待删除加工特征数组 DelFeatures,记录待删除加工特征的 FeatureID 和所属工序模型 ProcedureName.
- 步骤 4 若仅删除加工特征  $k$ ,根据 PathNum 记录的加工特征关联关系,查找依赖于加工特征  $k$  的加工特征,更新这些加工特征的 ParentID,从而重建变更传播模型结构.更新加工特征  $k$  之后的第  $k+1, k+2, \dots$  个加工特征,使用添加加工特征的算法对工序模型进行维护.
- 步骤 5 根据 PathNum 中加工特征间关联关系,查找依赖于加工特征  $k$  的所有加工特征,存储其信息至 DelFeatures.
- 步骤 6 在变更传播模型中,删除 DelFeatures 记录的加工特征.
- 步骤 7 根据 DelFeatures 记录的待删除加工特征所属工序模型信息,打开对应工序模型,并删除工序模型信息中的加工特征信息 Features.
- 步骤 8 判断 DelFeatures 记录的待删除加工特征所属工序模型信息中 Annotations 节点下是否为空,若为空,则删除该工序模型.

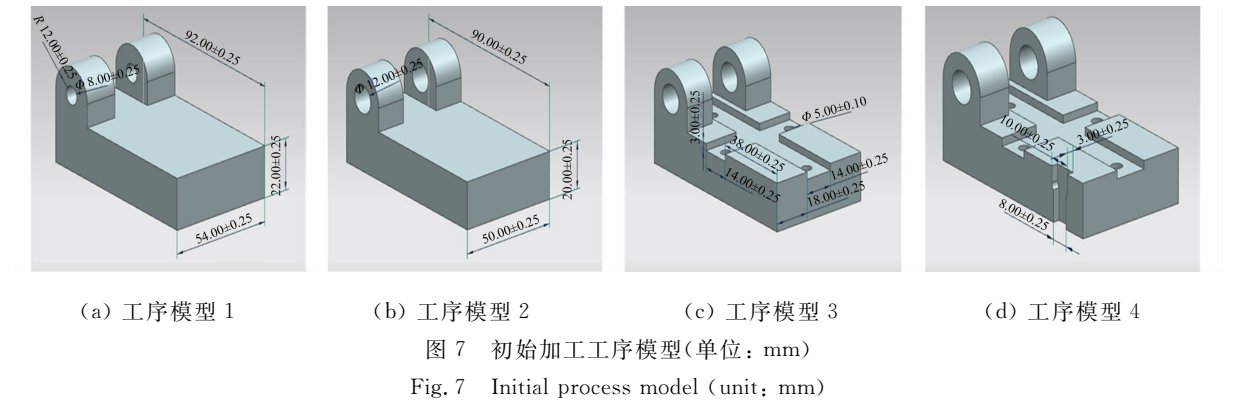
2.3 加工特征算法的添加

在工艺路线中添加新的加工特征,可以分为对后续加工特征有影响和无影响 2 类.在新加工特征归属三维工序模型方面,若新加工特征对后续加工特征无影响,则可以将此加工特征添加到任一三维工序模型,考虑加工效率和经济性,优先将新加工特征添加到有相似特征的工序模型中;若新加工特征对后续加工特征有影响,则必须将新加工特征归属于受影响的加工特征所属的工序模型或其前续加工模型.考虑新添加加工特征的不同类型,加工特征算法的添加有以下 9 个步骤.

- 步骤 1 遍历变更传播模型中的 Nodes 节点下的 FeatureType 属性,若存在与待添加加工特征  $k$  同类型的加工特征,转至步骤 2;否则,进入步骤 3.
- 步骤 2 在与待添加加工特征同类型的加工特征集合中选取一个加工特征,记为加工特征,获取其对应的 ProcedureName 属性,即该加工特征所处的工序模型记为工序模型  $i$ ,从而确定待添加加工特征所属工序模型,转至步骤 4.
- 步骤 3 根据工艺设计基本原则,选取某一工序模型作为新加工特征的依赖工序模型,记为工序模型  $i$ ,也可以在工序模型尾部新建工序模型作为新加工特征的依赖工序模型.
- 步骤 4 考察新添加加工特征  $k$  与变更传播模型中各加工特征的关联关系.若加工特征  $k$  处于某一加工特征关联子图的尾部,则在变更传播模型中对应 PathNum 的 Nodes 节点下新建加工特征  $k$  相关信息,并使用 ParentID 属性建立关联关系;若加工特征  $k$  处于某一加工特征关联子图中,则在变更传播模型中对应 PathNum 的 Nodes 节点下新建加工特征  $k$  相关信息,并查找依赖于加工特征  $k$  的加工特征,更新这些加工特征的 ParentID,从而重建变更传播模型结构.
- 步骤 5 若新建工序模型,转至步骤 9.
- 步骤 6 根据 PathNum 记录的加工特征间关联关系,确定依赖于加工特征  $k$  的  $n$  个加工特征.
- 步骤 7 新添加(修改)加工特征  $k$  后,重新建立工序模型  $i$  的工序模型信息,并与原工序模型信息进行对比,将差异信息(不包含 Annotations)添加到数组 ChangedFeatures.根据 ChangedFeatures 存储的信息,更新  $i$  之后所有工序模型的对应信息和三维模型.
- 步骤 8 依赖加工特征  $k$  的第  $j$  ( $1 \leq j \leq n$ ) 个加工特征进行更新,若  $j < n$ ,令  $k=j$ ,转至步骤 7.
- 步骤 9 拷贝工艺路线中的最后一个工序模型及信息,更新 ProcedureName,并删除 Features 节点下所有的 Annotations 信息.将新添加加工特征信息添加到该工序模型 Features 节点下.

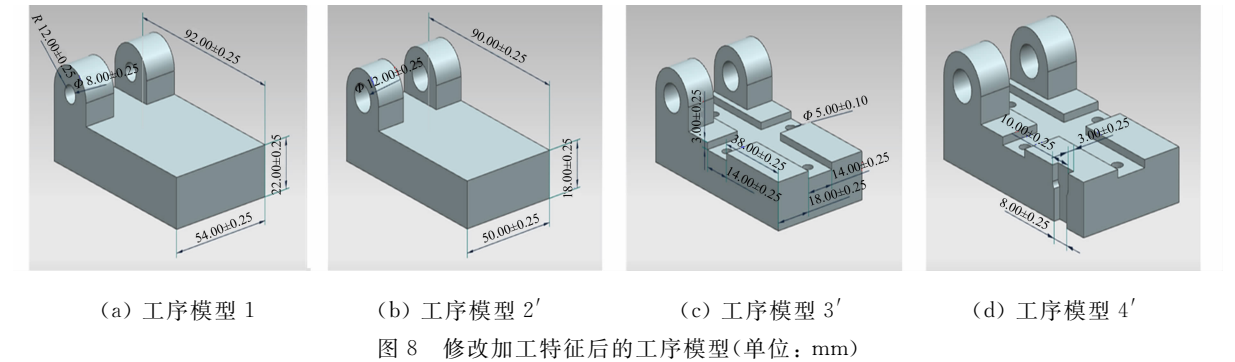
### 3 实例分析

以图 1 所示零件的加工过程为例,对节 2 加工特征变更方法进行有效性验证. 在图 1 的基础上添加模型尺寸,得到初始加工工序模型,如图 7 所示. 图 7 中: $R$  为外圆半径; $\Phi$  为孔直径.

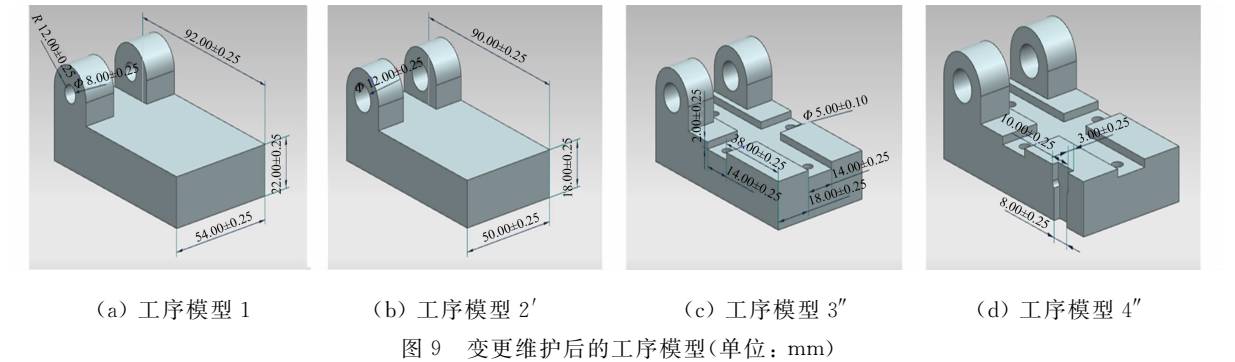


#### 3.1 加工特征的修改

假定待修改的加工特征为工序模型 2 中的外轮廓加工特征,要求上、下 2 个加工面分别加工 1 mm,得到工序模型 2'. 修改外轮廓加工特征后,根据工序模型 2' 重建工序模型信息,将新工序模型信息与原工序模型信息进行对比,在工序模型信息变化的基础上,更新后续工序模型,得到工序模型 3', 4', 如图 8 所示.



由图 4 可知:工序模型 3 中的 2 个开槽加工特征依赖于外轮廓加工特征. 故更改上加工面,开槽加工特征也将随之发生更改. 因此,再次使用修改加工特征算法,进行加工特征修改,得到修改后的工序模型 3'', 4'', 如图 9 所示.



#### 3.2 加工特征的删除

假定待删除加工特征为图 7 中工序模型 3 中的 2 个槽特征和孔特征. 根据删除加工特征算法,在变更传播模型中查找待删除加工特征,由图 4 可知:工序模型 3 中的 2 个槽特征(特征 3.1, 3.2)和孔特征(特征 3.3)位于加工特征关联子图的尾部,即无其他加工特征依赖于这 2 个槽特征和孔特征. 因此,删



除变更传播模型中 2 个槽特征和 1 个孔特征对应的节点及工序模型 3 中的加工特征,更新工序模型 4,得到删除加工特征后的工序模型,如图 10 所示. 由于工序模型 3 中的加工特征已经被删除,因此,删除工序模型 3.

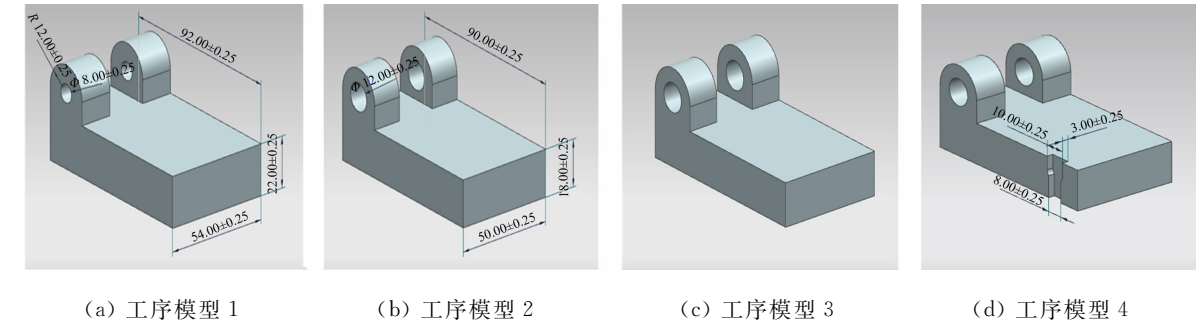


图 10 删除加工特征后的工序模型(单位: mm)

Fig. 10 Process model with machining features removed (unit: mm)

3.3 加工特征的添加

假定需要在底座上添加倒角特征,该加工特征也属于外轮廓加工. 遍历变更传播模型中各节点下的 FeatureType 属性,查找变更传播模型中存在外轮廓加工特征 2.1(图 4),从而确定将倒角特征添加到工序模型 2 中. 由于不存在依赖于倒角特征的加工特征,因此,将倒角特征直接添加到变更传播模型中对应的加工特征关联子图的尾部. 将加工特征添加到工序模型 2 中,重建工序模型信息,将新工序模型信息与原工序模型信息进行对比,在工序模型信息变化的基础上,更新后续工序模型,得到添加加工特征后的工序模型,如图 11 所示.

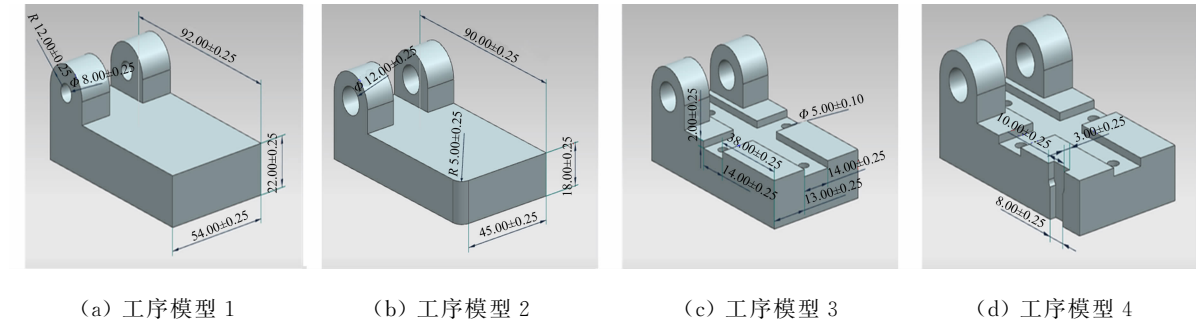


图 11 添加加工特征后的工序模型(单位: mm)

Fig. 11 Process model after adding machining features (unit: mm)

4 结束语

从工艺路线中的加工特征着手,以 DSM 聚类分析方法为基本研究方法,对加工特征变更传播的可能路径和影响范围进行分析,从而建立变更传播模型记录加工特征的关联关系及其与工序模型的对应关系. 通过建立适用于变更传播模型的工序模型信息组织结构,对工序模型信息进行组织管理,并通过研究不同类型变更来源的应对策略,实现三维机加工工序模型变更传播与维护. 实例验证表明:与基于特征关联进行三维工序模型变更的方法相比,文中方法在加工路径的多样性和加工特征的灵活性方面更具有优势,在工序模型的变更与维护上也更具有可靠性和优越性.

参考文献:

[1] QUINTANA V, RIVEST L, PELLERIN R, *et al.* Will model-based definition replace engineering drawings throughout the product lifecycle: A global perspective from aerospace industry[J]. Computers in Industry, 2010, 61(5): 497-508. DOI:10.1016/j.compind.2010.01.005.

[2] TRAINER A, HEDBERG T, FEENEY A B, *et al.* Gaps analysis of integrating product design, manufacturing, and quality data in the supply chain using model-based definition[C]// ASME 2016 International Manufacturing Science

- and Engineering Conference, Virginia, [s. n.], 2016; 1-19. DOI:10.1115/MSEC2016-8792.
- [3] LIU Xiaojun, LI Xiang, XING Jialu, *et al.* Integrating modeling mechanism for three-dimensional casting process model based on MBD[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94; 3145-3162. DOI: 10.1007/s00170-016-9479-2.
- [4] 万能, 苟园捷, 刘琳琳. MBD 机加工工序模型更改的主动传播与一致性维护方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013(6): 924-930. DOI:10.3969/j.issn.1003-9775.2013.06.021.
- [5] XU Xun, WANG Lihui, NEWMAN S T. Computer-aided process planning: A critical review of recent developments and future trends[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2011, 24(1): 1-31. DOI:10.1080/0951192X.2010.518632.
- [6] HUANG Rui, ZHANG Shusheng, BAI Xiaoliang, *et al.* Multi-level structuralized model-based definition model based on machining features for manufacturing reuse of mechanical parts[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 75(5): 1035-1048. DOI:10.1007/s00170-014-6183-y.
- [7] 乔虎, 周源, 白瑀. 采用特征识别技术的 MBD 模型自动语义标注方法[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2018, 39(5): 130-135. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201804086.
- [8] 乔虎, 吴庆云, 杜江, 等. 融合装配信息的三维装配模型检索方法[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2018, 39(4): 60-65. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201712045.
- [9] 于勇, 周阳, 曹鹏, 等. 基于 MBD 模型的工序模型构建方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(6): 6-15. DOI:10.3785/j.issn.1008-973X.2018.06.001.
- [10] 周秋忠, 郭具涛, 徐万洪. 工序 MBD 模型的参数化驱动生成方法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017(12): 129-132. DOI:10.13462/j.cnki.mmtamt.2017.12.032.
- [11] CARRILLO J E, GANIMON C. A framework for process change[J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2002, 49(4): 409-427. DOI:10.1109/TEM.2002.806712.
- [12] EHMANN K F, KAPOOR S G, DEVOR R E, *et al.* Machining process modeling: A review[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1997, 119(4): 655-663.
- [13] 唐敦兵, 徐荣华, 唐吉成, 等. 基于设计结构矩阵的工程变更影响分析[J]. 机械工程学报, 2010, 46(1): 154-161. DOI:10.3901/JME.2010.01.154.
- [14] 乔虎, 莫蓉, 向颖. 变更路径预测支持的自适应模块建模[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015(12): 2358-2366. DOI:10.3969/j.issn.1003-9775.2015.12.014.
- [15] SAATY T L. Decision making with the analytic hierarchy process[J]. International Journal of Services Sciences, 2008, 66(9): 83-98.
- [16] WALLENIS J, DYER J S, FISHBURN P C, *et al.* Multiple criteria decision making, multiattribute utility theory: Recent accomplishments and what lies ahead[J]. Management Science, 2008, 54(7): 1336-1349.
- [17] TANG Dunbing. Execution sequence planning of computational models based on incidence matrix and design structure matrix[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(12): 173-179.
- [18] BROWNING T R. Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: A review and new directions[J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2001, 48(3): 292-306. DOI:10.1109/17.946528.
- [19] CHEN Li, DING Zhendong, LI S. A formal two-phase method for decomposition of complex design problems [J]. Journal of Mechanical Design, 2005, 127(2): 184-195. DOI:10.1115/1.1778186.
- [20] 乔虎, 冯帆, 杜江, 等. 应用 Kano 模型的闭环产品聚类配置方法[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2018, 39(3): 349-354. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201712008.
- [21] 宫中伟, 莫蓉, 杨海成, 等. 基于矩阵的工程变更雪崩传播预测方法[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(12): 2619-2627. DOI:10.13196/j.cims.2012.12.43.gongzhw.015.
- [22] XU Changhong, ZHANG Shusheng, HUANG Rui, *et al.* NC process reuse-oriented flexible process planning optimization approach for prismatic parts [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87(1): 1-23. DOI:10.1007/s00170-016-8460-4.