

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2019.06.001

# 基于三维模型的机加工工艺设计关键技术

刘晓军<sup>1</sup>,刘金锋<sup>2</sup>,倪中华<sup>1</sup>,周宏根<sup>2</sup>,仇晓黎<sup>1</sup>

(1. 东南大学 机械工程学院,江苏 南京 211189; 2. 江苏科技大学 机械工程学院,江苏 镇江 212003)

**摘要:**基于三维模型的机加工工艺设计方法可以有效地继承三维设计模型的信息,实现以三维工艺模型为核心的工艺信息表达方式,对实现工艺的智能设计、与车间制造执行系统的深度集成具有支撑作用。本文对目前三维机加工工艺设计的关键技术的研究现状分析与阐述。分别对三维工艺信息的合理表达与组织管理、三维工艺模型的快速创建和工艺更改后的工艺模型动态重构等关键技术进行了论述,最后对三维机加工工艺设计技术存在的问题及未来研究方向进行了展望。

**关键词:**三维工艺规划;工艺信息;工艺模型;动态重构;总体框架

**中图分类号:**   **文献标志码:**   **文章编号:**1671-5276(2019)06-0001-06

## Review and Prospect of machining process planning technology based on 3D model

Liu Xiaojun<sup>1</sup>, Liu Jinfeng<sup>2</sup>, Ni Zhonghua<sup>1</sup>, Zhou Honggen<sup>2</sup>, Qiu Xiaoli<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China;

2. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

**Abstract:** The machining process planning method based on three-dimensional model can effectively inherit the information of three-dimensional design model, realize the process information expression mode with three-dimensional process model as the core, and play a supporting role in realizing intelligent process planning and deep integration with manufacturing execution system of shop floor. In this paper, the current research status of the key technology of 3D machining process planning is analyzed and elaborated. The key technologies such as the reasonable expression and organization management of 3D process information, the rapid creation of 3D process model and the dynamical reconstruction of process model after process change are discussed respectively. Finally, the existing problems and future research directions of 3D machining process planning technology are prospected.

**Keywords:** 3D machining process planning; process information; process model; dynamical reconstruction; main framework

## 0 引言

计算机辅助工艺设计(computer aided process planning, CAPP)技术是目前先进制造技术领域的研究重点,它作为连接产品设计与产品制造领域的桥梁,对产品质量和制造成本以及对市场的快速响应能力都具有极为重要的影响。传统的工艺设计方法依然沿用“三维模型设计+二维工艺生产”的混合模式,不仅工作量巨大、工艺信息表达不清,而且难以保证工艺数据传递的唯一性与时效性,随着制造业信息化、智能化水平的不断发展与提高,现有的工艺设计方法与上游的全三维数字化设计和下游的先进制造工艺及装备已不相适应,已逐渐成为数字化制造的瓶颈(图1),国内外各制造企业也逐渐向基于三维模型的工艺设计新模式转变<sup>[1-2]</sup>。

基于三维模型的工艺设计是以产品三维模型为基础,

融入工艺内容、工艺参数、工艺尺寸标注、工装模型、操作语义等信息的工艺技术,其中工艺信息不仅以三维形式表达,还关联于产品的三维模型,可在生产加工的动态演变过程中以三维形式进行工艺信息展示,使操作者能够非常直观地了解设计意图和工艺要求<sup>[3]</sup>。三维工艺模型作为工艺信息表达的载体,可在产品全生命周期中清晰地表达产品零件的加工过程,三维工艺模型的创建是三维工艺设计系统(3D-CAPP)系统的关键核心所在,工艺信息的表达则是评判该系统成熟的标准,同时工艺更改活动是产品研制过程中不可避免的,尤其是针对航空航天制造产品多型号、少批量、复杂性的特点,为满足制造企业对工艺模型更改后的快速响应要求,对于三维工艺模型在动态重构以及工艺信息的自动传播技术方面提出了更高的要求<sup>[4-5]</sup>。因此,本文针对三维机加工工艺设计技术的新问题、新需求,在分析大量机加工工艺设计相关文献的基础上,对三维工艺信息的合理表达与结构化组织管理、三维机加工工艺模型的

**作者简介:**刘晓军(1980—),男,河北张家口人,教授,江苏省高档数控机床及成套装备创新中心副主任,中国机械工程学会高级会员,中国机械工程学会成组与智能集成技术分会委员,机械工业自动化分会委员。长期从事先进制造理论及相关使能技术的集成和应用,包括基于全三维模型的机加/装配/铸造/钣金工艺设计技术、面向信息物理融合的装配集成与仿真技术、面向个性化产品的快速设计技术的研究。曾入选江苏省“青蓝工程”、“六大高峰”人才计划,江苏省“双创博士”资助计划,东南大学优秀青年教师资助计划。先后获得江苏省科技进步二等奖1项,机械工业联合会二等奖1项。主持或参与国家自然科学基金项目、总装备部预研基金重点项目、总装备部预研项目等项目10多项,主持和参与企业项目10项。已发表学术论文40多篇,申请发明专利10多项。

快速创建、工艺更改后工艺模型的动态重构与工艺信息自动传播等关键技术的研究现状作了详细综述,基于此,对三维机加工工艺设计技术相关的几个问题进行了讨论。基于三维模型的机加工工艺设计系统,把三维工序间模型作为

工艺信息的载体,一方面提供了相较于二维工艺更加丰富、直观的工艺表达方法,另一方面可以将更多的三维设计信息传递给下游的工人或设备,为实现基于模型的设计、工艺、制造一体化集成提供了技术支撑。

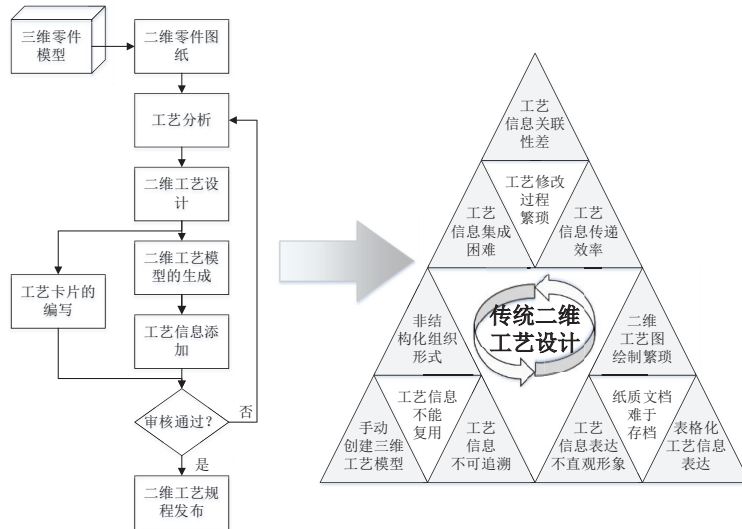


图1 传统二维工艺设计流程与特点

## 1 相关关键技术的研究现状

### 1.1 三维工艺信息结构化组织与管理技术

机加工工艺信息是产品工程信息的重要组成部分,是连接工程设计、管理信息等系统的重要桥梁<sup>[6]</sup>。基于模型定义(model based definition,MBD)的三维机加工工艺信息表达是以三维工艺模型为载体的,而三维工艺模型是以三维工序间模型为基础,包括工序工艺模型和工步工艺模型,且所有工艺模型都具有相同的结构形式,完成对加工信息的添加、工序间模型的构建、工艺信息的表达与管理、工艺信息与模型的关联等具体工作。为满足三维机加工工艺设计以及数字化加工制造的要求,国内外学者对工艺信息的组织与管理进行了大量的研究工作,主要集中在工艺信息表达和集成等方面。

BERNARD等<sup>[7]</sup>研究了基于产品全生命周期工艺信息的集成方法,对产品模型、基于知识关联的产品工艺模型进行了定义,有助于产品的工艺决策及工艺信息重用;赵岩等<sup>[8]</sup>为实现工艺信息共享到企业外部,提出了工艺信息的标准化描述模型,该模型分为信息元和行为元,分别包含了工艺信息的具体内容和处理方法;吕盛坪等<sup>[9]</sup>提出了一种制造过程数据形式化的表达方法,创建了制造过程数据模型与过程描述语言核心语义的映射关系,保证了制造过程数据具有规范的过程语义;张祥祥等<sup>[10]</sup>提出了一种机加工工艺信息标识方法,能够有效地规范机加工工艺信息标识符号的构建和组合方法,方便工艺人员直观快速浏览与获取工艺信息;ZHANG等<sup>[11]</sup>运用二维工程图的加工语义和加工几何信息重建加工过程中动态演变的工艺模型,并以回转体零件进行了方法验证,该方法能够集成工艺资源和相关工艺信息。学者们为实现工艺信息更好的描述与集成,提出了基于可扩展标

记语言(eXtensible markup language,XML)来建立零件加工过程信息的标准化描述。齐建军等<sup>[12]</sup>为实现异构系统间数据交换的内容和格式,提出了统一的基于XML模型的信息集成规范;ŠORMAZ等<sup>[13]</sup>提出了利用面向对象的表示方法对产品模型、工艺模型以及加工过程所包含的工艺数据用XML进行表达,该方法不仅能够提高产品质量、减少成本、缩短产品制造周期,而且还能实现系统之间的无缝集成;陈万领等<sup>[14]</sup>通过分析计算机辅助工艺设计过程中工艺信息,建立了系统的通用数据模型,以实现基于XML对工艺信息的表达;张胜文等<sup>[15]</sup>设计了基于XML语言的工艺数据,在基于Web的CAPP系统中进行表达与应用。随着面向基于MBD的工艺模型表达工艺信息的研究吸引了许多学者的关注,以MBD工艺模型作为生产制造过程的唯一依据,将所有相关的工艺模型信息、管理信息等都关联于产品三维模型中,真正实现三维模型贯穿产品生产制造的全过程。HUANG等<sup>[16]</sup>基于特征技术提出了一个多层次的MBD模型,该模型集成了产品模型的基本信息、详细特征信息以及加工语义信息,实现了加工信息重用;田富君等<sup>[17]</sup>建立了MBD的工艺信息模型,采用多视图的形式显示工艺信息;胡祥涛等<sup>[18]</sup>提出了利用MBD技术在三维模型上标注产品信息的方法,该方法通过对三维标注信息分视图、分图层的合理管理方法,实现了产品信息的合理有效表达;ZHOU等<sup>[19]</sup>基于MBD模型提出了自动实现产品工艺设计信息表达和转换的方法,将工艺设计过程中的属性信息和标注信息集成于三维实体模型中进行表达。

以上文献分别对产品生产加工所需工艺信息的组织和管理进行了总结分析并创建了对应的表达模型,但大多数文献都是基于二维工艺开展的应用研究,其中,文献[12]~[15]提出了基于XML对工艺信息的描述可实现异构系统之间的数据交换,如何利用XML技术在三维环境下实现便捷有效地管理工艺信息的技术方法有待进一步研究。文献[16]~[19]提出了基于MBD工艺模型表达工艺信息的方法,可较好的

实现工艺信息合理且高效地表达与管理,工艺信息与工艺模型之间的关联关系以及工艺信息的管理机制有待进一步研究完善。因此,如何实现三维工艺信息的合理化表达与管理是提高三维工艺设计效率的关键性问题。

## 1.2 三维机加工工艺模型快速创建技术

基于三维机加工模型进行计算机辅助工艺规划已成为企业的迫切需求,如何进行快速创建三维工序间模型是工艺设计的关键。三维机加工工艺模型研究的基本思路为:首先从三维模型上获取零件加工制造特征,然后根据这些特征进行工艺设计、添加工艺内容等,最后形成三维工艺文件<sup>[20]</sup>。在面向机加工制造特征的研究方面,目前针对工序间模型的创建主要有基于交互式和基于特征识别两种创建方法,以加工特征识别及工艺知识推理为主。

### 1) 基于商业 CAD 软件创建工序间模型

大多数制造企业的工艺设计部门基于交互式创建工序间模型的方法大都是借助商业 CAD 软件进行的,通过手动修改(如拉伸、回转、扫掠等)设计模型来创建,并且很多文献也研究了如何基于商业 CAD 软件创建工序间模型,如王宗彦等<sup>[21]</sup>、AMAITIK 等<sup>[22]</sup>、顾琳等<sup>[23]</sup>分别通过商业 CAD 软件驱动加工特征参数的手段均获取或输出了零件加工过程的中间模型;田富君等<sup>[24]</sup>通过 UG 软件的 WAVE 参数化建模工具建立了零件的各工序模型,但上述方法最大的不足之处在于创建的工序间模型之间没有关联性,且创建过程操作繁琐,重复工作量大,相对阻碍了基于交互式创建工艺模型的设计效率。

### 2) 基于特征识别创建工序间模型

基于特征识别创建工序间模型的方法是研究如何获取工序加工所去除的材料体积,通过每个工序加工所形成相对应的加工特征来创建工序间模型,为此,大量文献研究了基于体积分解方法、基于痕迹方法以及基于几何推理方法等通过特征识别创建工序间模型的方法。Sakurai<sup>[25-26]</sup>对多面体与曲面立体基于单元分解法进行了深入研究,并提出了该方法应用于特征识别的 3 个步骤:1)将毛坯与零件之间体积分解成一系列小单元体;2)单元体合并;3)特征的分类。WOO<sup>[27]</sup>对基于凸包体积分解法进行了应用,并由 KIM<sup>[28]</sup>对其 ASV(alternating sum of volumes)算法进行了改进优化,提出了 ASVP(alternating sum of volumes with partitioning)算法并验证其收敛性,其具体步骤是:1)利用 ASVP 方法将零件分解为若干个凸包形式;2)通过启发式规则识别或生成形状特征;3)生成原始的加工特征;4)将加工特征进行聚类分析并识别加工特征。VANDENBRANDE<sup>[29]</sup>等人针对在搜索特征时不能准确获取确切的几何特征(如点、线、面),提出了基于痕迹法识别特征的方法以解决特征相交时属性变化的问题,并在此基础上,为更好地获取特征对应的去除体积,RAHMANI 等<sup>[30-31]</sup>将基于痕迹方法与图匹配方法相结合进行特征处理。JANAC 等<sup>[32]</sup>基于几何推理的方法实现了将设计模型转化为加工过程的中间模型,再利用中间模型将毛坯模型转化为产品。RAMAN 等<sup>[33]</sup>利用刀具的分类以及加工所形成的边界面和相邻面,获取约束刀具运动的表面将其转换为所去除最大材料体积的表面,借助几何推理的

方法获取加工表面来形成工序去除体积。基于工艺知识创建三维工艺模型方面,石云飞等<sup>[34]</sup>提出了基于加工语义驱动三维工艺模型的方法,以数字化工艺卡片为研究对象,采用自然语言理解技术,从工序语言中提取工艺语义模型,指导二维工序图逐渐重建零件的三维工序模型。范海涛等<sup>[35]</sup>在此基础上进行了扩展,提出了基于工序语义驱动下实现二维工序图的特征识别。万能等<sup>[36]</sup>通过收集工艺知识建立工艺本体,并构建了建模本体与工艺本体之间的映射关系,提出了工序模型的正序和逆序生成方法。

综合上述文献,基于二维工艺设计技术研究没有解决工艺模型快速创建的问题,工艺模型的创建过程大都依赖于工艺人员的经验,并没有考虑已有的三维模型知识。此外,工序间模型的创建并非线性的,也使得工艺数据与工序间模型的关联性很难建立,导致创建工序间模型的过程繁琐,工作量大,效率低,因此,如何快速创建三维工序间模型的问题已成为 3D-CAPP 技术发展的瓶颈。

## 1.3 三维机加工工艺模型动态重构技术

工艺更改是工艺设计活动中工艺人员对已经生效的工艺规程内容进行更改的行为,是工艺设计过程中不断提高设计水平、提高生产率、适应生产实际需要的过程。工艺更改活动包括:调整工序顺序、插入工艺模型、合并工艺模型、删除工艺模型、更改加工方法、更改零件属性信息、更改夹具信息、更改装备信息以及更改标注信息等内容。工艺更改并非只针对当前工序的更改,在大多数情况下工艺更改后都会引发其它工艺模型和工艺信息的更改,例如若某一工序模型更改后,所关联的几何信息与标注信息都会发生变化,也会导致其它工艺模型关联的工艺信息发生改变<sup>[37]</sup>。因此,在工艺更改后如何实现工艺模型的动态重构与工艺信息的自动传播方面吸引了众多学者的关注。

### 1) 在提高工艺更改效率与维护工艺信息一致性方面

邓云初<sup>[38]</sup>等基于信息管理系统提出了手动更改流程和自动控制更改流程,并在某客车制造厂商成功实施了工艺更改方案。史晓健等<sup>[39]</sup>分析了工艺更改管理中普遍存在的问题,基于工作流创建了工艺更改过程的建模与控制方法,提出了一种基于产品数据管理(Product Data Management, PDM)的工艺更改过程管理方案,该方案不仅能够实现工艺更改过程的自动运行,而且还可以通过 PDM 系统对工艺更改流程和更改文档进行有效地控制与管理。张博等<sup>[40]</sup>结合航空行业复杂产品自身的特点,提出了符合航空制造企业实际工艺更改业务需求的工艺更改模型,构建了协同更改体系,以满足航空复杂产品对工艺更改的可控性。邹光勇等<sup>[41]</sup>基于电子工艺卡片,借助 CAPP/PDM/MES 系统的集成应用,较好地解决了数字条件下工艺文件实例化、更改流程控制、消息触发和工序控制等技术难题。以上文献主要在工艺更改的模型表达、更改流程、控制以及管理等方面方面进行了详细阐述,但在工艺更改后工艺模型与工艺信息如何快速响应方面没有进行研究。

### 2) 在工艺更改后三维工艺模型自动重构方面

工艺更改后三维工艺模型的自动重构是提供工艺设计效率的关键。针对同一模型的创建, CAD 软件可提供不同的模型表达方式,但模型所具有的设计意图是相同



的,如果其他设计者没有理解模型的设计意图,就很难对该模型进行更改<sup>[42]</sup>。为获取 CAD 模型的设计意图,学者们提出了利用标准数据对模型信息进行转换的方法<sup>[43-44]</sup>,或者匹配近似的 CAD 模型<sup>[45]</sup>来获取设计意图。目前,商业 CAD 软件大都是基于特征或基于参数进行模型创建,均具有捕捉设计内容的能力。基于特征建模方面,SUBRAMANI 等<sup>[46]</sup>利用相交特征进行几何特征修改内容的传递;BRONSVOORT 等<sup>[47]</sup>提出了多层次特征建模框架,该方法能够将概念设计、详细设计、装配设计以及工艺设计等内容进行传递。基于参数建模方面,SILVA 等<sup>[48]</sup>为避免在模型更新过程中无效零件的生成,提出了利用参数建模方法以有效传递修改的几何特征;YANG 等<sup>[49]</sup>为了减少模型重建和装夹时间,提出了基于设计历史机制的方法来修复 CAD 模型。上述文献针对设计模型的更改均是对同一模型进行操作的,而对于三维工艺模型是一个动态变化的模型,且还关联着不同的工艺信息,设计模型更改的主动传播技术并不能保证工艺更改后三维工艺模型的自动重构。

### 3) 在工艺更改后工艺内容自动更新方面

LIU 等<sup>[50]</sup>提出了基于动态特征的建模方法以解决工艺更改后加工条件动态改变和加工资源不确定的问题。TIWARI 等<sup>[51]</sup>为了匹配相似的加工工艺,提出了计算零件模型与实例模型相似性的方法,但该方法需要创建大量的实例模型。NASSEHI 等<sup>[52]</sup>创建了一个 CNC (Computer Numerical Control) 加工软件平台,能够根据更改的工艺信息动态生成 CNC 代码。以上文献是针对 CNC 代码的动态生成和加工资源匹配进行的相关研究,且均是面向二维

工艺设计为应用基础的。

目前,制造企业的三维工艺模型大多数是基于商业 CAD 软件进行创建的,虽然商业 CAD 平台在不同程度上支持三维建模过程中引用其他模型的几何要素,但无法基于机加工的高层语义维护工艺更改后三维机加工工艺模型的一致性<sup>[53]</sup>。在工艺更改过程中,设计人员仍需要对原设计模型进行人工交互以重建、修改、更新三维模型。因此,在工艺更改后如何实现工艺模型的动态重构与工艺信息的自动传播是研究三维机加工工艺设计的关键环节。

## 2 系统总体框架结构

纵观三维机加工工艺设计的相关关键技术的文献资料,基于三维模型的三维机加工工艺设计并不仅是简单地将二维工程图包含的非几何信息反映到三维模型中,而是对整个三维模型零件的设计、制造和管理过程以三维工艺模型的形式进行展示与表达。三维机加工工艺设计要充分利用三维模型生动、直观的表达优势,以方便工艺人员更高效、准确地理解设计意图,获取设计信息,为满足三维机加工工艺设计的需求分析,东南大学先进制造技术研究所的课题组针对三维机加工工艺信息可视化组织表达及管理<sup>[54-55]</sup>、工艺模型特征识别与快速创建<sup>[56-59]</sup>、工艺模型动态重构与自动更新<sup>[60]</sup>等方面进行了深入研究,并独立开发了三维机加工工艺设计系统软件平台,其系统总体框架结构图如图 2 所示。基于三维模型的机加工工艺设计系统不仅能够减少重复劳动、提高工艺设计效率,而且能够保证工艺信息传递的唯一性和准确性,对缩短产品的生产研发周期具有重大意义。

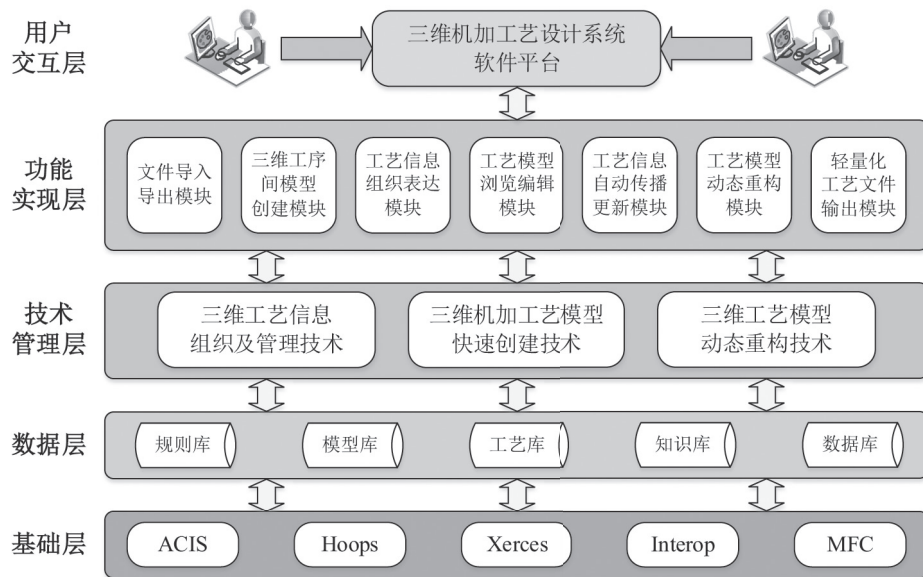


图 2 三维机加工工艺设计系统总体框架结构图

## 3 研究展望

基于三维模型的机加工工艺设计系统应是一个面向企业应用级的系统,能够实现工艺设计、工艺仿真与验证、工

艺实施等关键功能,以解决复杂产品零件生产制造中工艺业务与数据集成的问题,为实现制造企业在技术与装备上的智能化提供全新的思路。鉴于三维机加工工艺设计相关关键技术的限制,三维机加工工艺设计系统仍需不断改进与完善,主要体现在以下几个方面:

1) 工艺设计系统功能与集成扩展方面应继续深入研究。

基于三维模型的机加工工艺设计系统,不但能够对机加零件的加工过程进行工艺设计,还应不断扩展系统的其他功能,如钣金成型工艺、加工精度分析、CNC 代码自动生成、加工过程虚拟仿真动画等,使系统更全面、更完备地支持全三维工艺设计流程。该工艺设计系统应能够无缝实现与 CAD 以及 CAM 系统之间的信息集成和过程集成,而对于与 CAE、PDM、MES 以及 ERP 等系统间的集成仍需进一步研究。同时,基于 MBD 三维工艺模型的信息集成还需不断扩大,以支持铸造、装配以及检测等系统对工艺信息的需求。

2) 工序间模型生成的特征面组识别与获取方面应继续提高效率。

由于机加工零件具有复杂性与多样性的特点,以及基于交互式获取加工特征面组的局限性,若零件含有复杂相交特征、复杂表面过渡特征以及曲面特征(如螺旋锥齿轮、叶轮叶片等),在识别加工特征面组时将会出现误差,甚至不能获取相应的特征面组,从而无法准确获取制造特征体及零件的工序间模型。随着智能化制造技术的发展,在工艺设计阶段就应开展特征识别技术,实现对各类零件的加工特征面组自动化工艺设计,以进一步提高工艺设计效率。

3) 三维模型数据在兼容性方面应继续统一标准。

本课题组开发的基于三维模型的机加工工艺设计系统能顺利执行的前提条件是三维模型信息的准确导入,只有符合系统设定的数据格式才能准确地输入并成功获取模型的属性信息。但若是其它格式的文件进行导入时,就必须考虑数据的提取和兼容性方面的问题,由于现阶段各商业 CAD 软件对零件属性信息的结构化数据并不统一,导致在模型数据导入该系统时往往会出现数据丢失或不一致的问题。因此,在三维模型数据源的兼容性方面应朝着统一化、标准化的方向进一步研究与发展。

## 4 结语

随着数字化设计与制造技术在制造企业的广泛应用,产品研制模式也正发生根本性变化,三维模型在产品全生命周期中的使用、贯穿和传递已成为制造企业研究应用的重点。本文以基于三维模型的机加工工艺设计系统的相关关键技术为切入点,借助大量文献综述阐述并探讨了三维工艺信息的合理表达与结构化组织管理技术、三维机加工工艺模型的快速创建技术以及工艺更改后工艺模型的动态重构与工艺信息自动传播技术的研究现状,并提出了集成上述关键技术应用的三维机加工工艺设计系统总体框架结构,为独立开发三维机加工工艺设计系统软件平台提供了整体思路,该系统对提高工艺设计效率、缩短机加工零件的制造周期具有重要的工程实际意义。

下一步研究将考虑在工艺设计系统功能与集成扩展、工序间模型的特征面组识别与获取、三维模型数据兼容性等方面的开发,以完善和丰富基于三维模型的机加工工艺设计系统的企业级应用。

### 参考文献:

[1] 陈兴玉,张红旗,陈帝江,等. 复杂机电产品全三维工艺设计方法[J]. 雷达科学与技术,2010,8(5):474-479.  
[2] SUDARSAN R, FENVES S J, SRIRAM R D, et al. A product

information modeling framework for product lifecycle management [J]. Computer-aided design,2005,37(13):1399-1411.

- [3] 余志强,陈嵩,孙炜,等. 基于 MBD 的三维数模在飞机制造过程中的应用[J]. 航空制造技术,2009,25(S2):82-85.  
[4] 石竖鲲,马艳玲,张森棠. 数字化制造技术在航空发动机产品中的应用研究[J]. 航空制造技术,2013(1):43-47.  
[5] 贾晓亮,张振明,田锡天,等. 航空制造企业面向协同的工艺并行设计系统研究与应用[J]. 航空制造技术,2008(21):77-81.  
[6] 蔡长韬. 基于 STEP/XML 的集成化工艺信息描述方法研究[J]. 计算机集成制造系统,2008(5):912-917.  
[7] BERNARD A, PERRY N. Fundamental concepts of product/technology/process informational integration for process modelling and process planning[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing,2003,16(7/8):557-565.  
[8] 赵岩,莫蓉,常智勇,等. 网络环境下的工艺信息标准化描述模型[J]. 计算机集成制造系统,2008(6):1106-1112.  
[9] 吕盛坪,乔立红,刘威. 制造过程数据形式化语义建模[J]. 机械工程学报,2012(10):184-191.  
[10] 张祥祥,陈兴玉,程五四,等. 基于模型的工艺信息标识方法研究[J]. 图学学报,2012,33(6):146-150.  
[11] ZHANG S, SHI Y, FAN H, et al. Serial 3D model reconstruction for machining evolution of rotational parts by merging semantic and graphic process planning information[J]. Computer-Aided Design,2010,42(9):781-794.  
[12] 齐建军,刘爱军,雷毅,等. 基于 XML 模式的制造信息集成规范的研究[J]. 计算机集成制造系统,2005,11(4):565-571.  
[13] ŠORMAZ D N, ARUMUGAM J, HARIHARA R S, et al. Integration of product design, process planning, scheduling, and FMS control using XML data representation[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,2010,26(6):583-595.  
[14] 陈万领,陈卓宁,宾鸿赞,等. 基于 XML 的工艺信息表达方法研究与实践[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2006,34(3):46-49.  
[15] 张胜文,景睿,方喜峰. 基于 XML 的 CAPP 工艺数据表达技术研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版),2012,26(2):141-145.  
[16] HUANG R, ZHANG S, BAI X, 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(5/6/7/8):1035-1048.  
[17] 田富君,田锡天,耿俊浩,等. 基于模型定义的工艺信息建模及应用[J]. 计算机集成制造系统,2012,18(5):913-919.  
[18] 胡祥涛,程五四,陈兴玉,等. 基于 MBD 的产品信息全三维标注方法[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2012(S2):60-63.  
[19] ZHOU Q Z, DENG L Y. MBD based automotive products process planning technology[C]// Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications,2011,88:570-575.  
[20] ZHOU X, QIU Y, HUA G, et al. A feasible approach to the integration of CAD and CAPP[J]. Computer - Aided Design,2007,39(4):324-338.  
[21] 王宗彦,吴淑芳,秦慧斌. 零件的设计模型向毛坯模型转换技术研究[J]. 计算机集成制造系统,2004(6):620-624.  
[22] AMAITIK S M, KILIC S E. STEP-based feature modeller for computer-aided process planning[J]. International Journal of Production Research,2005,43(15):3087-3101.  
[23] 顾琳,刘文剑,康小明,等. 三维零件的半智能化工序图生成

- 系统[J]. 机械工程师,2003(10):3-6.
- [24] 田富君,田锡天,耿俊浩,等. 工序模型驱动的工艺设计方法[J]. 计算机集成制造系统,2011,17(6):1128-1134.
- [25] SAKURAI H. Volume decomposition and feature recognition: Part I—polyhedral objects[J]. Computer-Aided Design, 1995, 27(11):833-843.
- [26] SAKURAI H, DAVE P. Volume decomposition and feature recognition, Part II: curved objects[J]. Computer-Aided Design, 1996,28(6):519-537.
- [27] WOO T C. Feature extraction by volume decomposition[C]//Conference on CAD/CAM technology in mechanical engineering,1982:76-94.
- [28] KIM Y S. Recognition of form features using convex decomposition[J]. Computer-Aided Design, 1992,24(9):461-476.
- [29] VANDENBRANDE J H, REQUICHA A A G. Spatial reasoning for the automatic recognition of machinable features in solid models[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 1993,15(12):1269-1285.
- [30] RAHMANI K, AREZOO B. A hybrid hint-based and graph-based framework for recognition of interacting milling features[J]. Computers in Industry,2007,58(4):304-312.
- [31] RAHMANI K, AREZOO B. Boundary analysis and geometric completion for recognition of interacting machining features[J]. Computer-Aided Design,2006,38(8):845-856.
- [32] JANAC A, OSANNA P H, KURIC I. Contribution to modelling of process planning[J]. e&i Elektrotechnik und Informationstechnik, 1997,114(4):182-185.
- [33] RAMAN R, MAREFAT M M. Integrated process planning using tool/process capabilities and heuristic search[J]. Journal of Intelligent Manufacturing,2004,15(2):141-174.
- [34] 石云飞,张树生,成彬,等. 工艺语义驱动的序列三维模型构建系统[J]. 计算机集成制造系统,2009,15(11):2133-2139.
- [35] 范海涛,张树生,陶俊,等. 工艺语义驱动的铣削类零件加工特征识别技术[J]. 计算机集成制造系统,2012,18(2):306-313.
- [36] 万能,赵杰,莫蓉. 三维机加工序模型辅助生成技术[J]. 计算机集成制造系统,2011,17(10):2112-2118.
- [37] YANG F, TANG X, DUAN G. Searching model of change propagation paths for mechanical product based on characteristic linkage network[J]. Jixie Gongcheng Xuebao (Chinese Journal of Mechanical Engineering), 2011,47(19):97-106.
- [38] 邓云初,蒋辉. 工艺信息管理系统中工艺更改的实现[J]. 航空制造技术,2002(7):66-68.
- [39] 史晓健,乔立红. 在 PDM 中实现工艺更改过程管理[J]. 航空学报,2007,28(1):240-244.
- [40] 张博,贾晓亮,石炳坤. PLM 协同环境下航空复杂产品工艺更改技术研究[J]. 航空精密制造技术,2013,49(4):48-52.
- [41] 邹光勇,刘翔,白雪. 面向无纸化制造的工艺现场更改模式探索与实践[J]. 航空制造技术,2015,478(9):62-65.
- [42] 张欣,莫蓉,陈涛,等. 面向设计意图不变的三维 CAD 模型重用方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2012,24(10):1356-1362.
- [43] KIM J, PRATT M J, IYER R G, et al. Standardized data exchange of CAD models with design intent[J]. Computer-Aided Design,2008,40(7):760-777.
- [44] KIM B C, MUN D, HAN S, et al. A method to exchange procedurally represented 2D CAD model data using ISO 10303 STEP[J]. Computer-Aided Design,2011,43(12):1717-1728.
- [45] 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.
- [46] SUBRAMANI S, GURUMOORTHY B. Maintaining associativity between form feature models[J]. Computer-Aided Design, 2005,37(13):1319-1334.
- [47] BRONSVOORT W F, NOORT A. Multiple-view feature modelling for integral product development[J]. Computer-Aided Design,2004,36(10):929-946.
- [48] SILVA J, CHANG K H. Design parameterization for concurrent design and manufacturing of mechanical systems[J]. Concurrent Engineering,2002,10(1):3-14.
- [49] YANG J, HAN S. Repairing CAD model errors based on the design history[J]. Computer-Aided Design,2006,38(6):627-640.
- [50] LIU C, LI Y, SHEN W. Dynamic feature modelling for closed-loop machining process control of complex parts[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing,2015,28(7):753-765.
- [51] TIWARI M K, KOTIAH K R, Bhatnagar S. A case-based computer-aided process-planning system for machining prismatic components[J]. The international journal of Advanced manufacturing technology,2001,17(6):400-411.
- [52] NASSEHI A, LIU R, NEWMAN S T. A new software platform to support feature-based process planning for interoperable STEP-NC manufacture[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing,2007,20(7):669-683.
- [53] 万能,苟园捷,刘琳琳. MBD 机加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.
- [54] 刘金锋,倪中华,刘晓军,等. 基于工艺模型的工艺信息表达与管理技术[J]. 计算机集成制造系统,2015,21(7):1756-1763.
- [55] LIU J F, LIU X J, CHENG Y L, et al. The backward growing method for constructing 3D process models in the machining process planning[C]//2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. IEEE, 2014:988-992.
- [56] 刘晓军,倪中华,程亚龙,等. 面向板腔类零件机加工工艺的加工特征识别方法[J]. 计算机集成制造系统,2013,19(12):3130-3138.
- [57] 刘金锋,倪中华,刘晓军,等. 三维机加工工艺工序间模型快速创建方法[J]. 计算机集成制造系统,2014,20(7):1546-1552.
- [58] LIU J, LIU X, CHENG Y, et al. An approach to mapping machining feature to manufacturing feature volume based on geometric reasoning for process planning[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture,2015:1-13.
- [59] LIU J, LIU X, CHENG Y, et al. An algorithm of mapping the protrusion feature on the slanting face to its manufacturing feature volume in the process planning[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79(1/2/3/4):361-376.
- [60] LIU J, LIU X, CHENG Y, et al. A systematic method for the automatic update and propagation of the machining process models in the process modification[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2016,82(1/2/3/4):473-487.

收稿日期: - -