

# 飞机零件制造模型及 数字化定义\*

Model and Digital Definition of Aircraft Component Manufacturing

西北工业大学机电学院 王俊彪 刘 闯



王俊彪

西北工业大学教授,博士生导师,现任西北工业大学科技处处长,陕西省制造业信息化专家组组长,陕西省数字化制造工程技术研究中心主任。从事数字化制造技术、飞机钣金精密成形工艺与装备的研究和人才培养工作,先后主持国家 863 计划、国防基础科研等项目,获得国家和省部级奖励多项。

数字化设计制造方式是现代飞机研制的基础和先决条件之一。大型飞机研制已全面采用以数字化为核心的设计制造技术体系。其中,在产品模型数字化定义方面,零件三维

在大飞机数字化制造中,不仅仅是用数字化的装备改变传统的制造工艺过程,而且新的产品信息模型定义技术同样使制造过程产生重大的变革。本课题提出用 MBD 数据集和 DMM 数据集共同构成面向全数字化制造的产品模型,将改变原有的产品制造技术体系,实现数字化向产品制造过程的延伸。

实体建模和产品数字样机技术已成为基本选择,产品零部件的几何特征通过三维模型准确地描述。然而,三维模型在制造过程中的直接应用困难重重。一方面,“三维(3D)建模”加“二维(2D)发图”是制造过程中的典型场景,但传统 3D 模型仅用于表达产品几何特征,表达多个视图及尺寸和公差的 2D 纸介质图纸是制造过程中的主控文件。图纸与模型分离造成了以三维为依据、二维为参考还是以二维为依据、三维为参考的混乱,处于下游的制造单位要不断协调三维模型有效性等问题。另一方面,由于未能考虑零部件制造工艺过程的中间状态,无法解决设计信息向制造延拓的矛盾<sup>[1]</sup>。典型零件的工艺流程包括控形、改性、检验等多种类型工序,毛坯等工序件仍以模拟量

的载体形式存在。如何定义工艺设计、工装设计、设备控制所需的模型,是能否“打通数字化线”要解决的关键问题。

## 面向制造的零件模型

### 1 数字化制造对模型定义技术的要求

飞机数字化设计制造技术的关键是数字量载体下零件制造时空范围内产品信息的内容及其表达和应用。数字化制造要求从产品制造全过程的不同需求来全面地描述产品的信息,而数字化制造对产品建模提出的新要求根源于制造的 2 个工程特性。

(1) 制造的不准确性要求在模型中表达公差及尺寸信息。

在零件的加工过程中由于各种因素的影响会产生形状、位置方面的

\* 国家 863/CIMS 主题项目(2007AA04Z139)、教育部博士点基金项目(20070699052)资助。

误差,零件的实际尺寸与设计者确定的基本尺寸存在差别。为了保证零件之间能“装”到一起,零件的尺寸偏差是有限制的。要处理好产品的使用要求与制造工艺的矛盾,解决方法是规定合理的公差,并用检测手段保证其贯彻实施。因此,要把3D模型作为车间的制造依据,3D模型上应包括传统的图纸中所表达的尺寸与公差信息、质量控制与检验相关信息等非几何信息,即基于模型的定义。

(2)制造的多工序性要求面向工艺链表达工序件信息。

制造工程包括工艺准备链和工艺过程链2个链。产品制造过程由多个工序组成,产品可以用1个模型表达,而产品加工过程中每个工序加工对象的几何模型是不同的。传统制造模式中以模线、样板等模拟量作为毛坯等工序件信息载体,传递环节多、误差大。数字化制造的实质是在生产加工之前工艺准备中完成产品、过程和资源的数字化定义,以驱动制造的物理过程。因此,要为数字化工艺设计、工艺装备设计及设备控制提供依据,要用数字量表达和定义的相互联系的工序件。

## 2 MBD与制造模型

传统的3D模型实现了零件的“好看”,但它主要是面向设计的,故可称为设计模型。而要实现3D模型在制造过程中“好用”,则需满足上文的2个要求,即采用基于模型的定义(Model Based Definition, MBD)技术实现3D模型标注公差等信息;定义零件数字化制造模型(Digital Manufacturing Model, DMM)来表达工艺装备和工艺过程所需的3D模型。设计模型与制造模型共同构成产品的工程模型。

(1)基于模型的定义技术(MBD)。

基于模型的定义是用集成的三维实体模型来完整表达产品定义信息的方法,从而消除或者减少2D图

纸,供下游用户使用。模型是带有标注的三维CAD模型,包括几何形状特征、尺寸公差、注释以及与制造、管理相关的属性(如图1所示),定义是三维实体模型建模及模型中产品尺寸与公差的标注规则和工艺信息的表达方法。

一,波音公司在787项目中推广使用了基于模型的数字化定义技术<sup>[2]</sup>。

(2)零件制造模型。

制造模型是相对于设计模型而提出的,是产品制造周期工艺过程阶段工序件信息的描述。制造模型是以零件设计模型为基础,在综合考虑

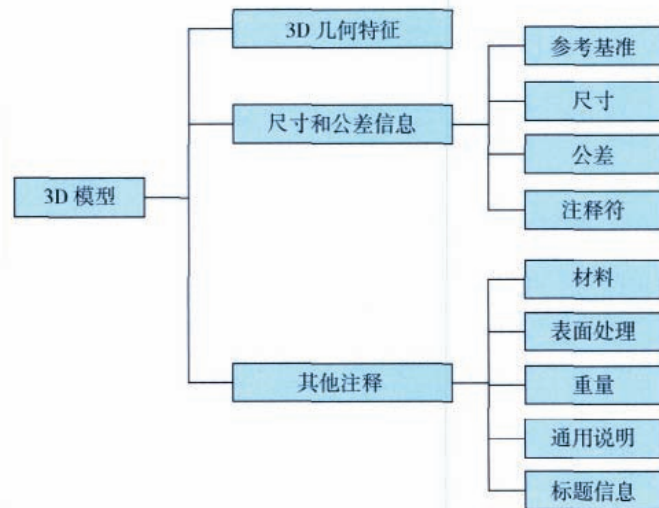


图1 MBD数据集的内容

MBD可采用CAD的特征树来分类组织和管理产品数据,实现模型信息的有序可控,存储3D模型的各个视图使得信息显示更加容易。MBD数据集要用于设计、制造和检验,可以通过PDM系统内嵌的浏览器、第三方浏览器和CAD软件查看和应用。作为该项技术的发起者之

制造工艺过程和工艺资源的基础上,所定义出的控制零件制造过程的数字模型<sup>[3-4]</sup>。制造过程由多工序构成,制造模型由工序件模型构成,其定义既有几何问题,更有物理问题。制造模型是多态的、衍化的,工序件模型反映了加工过程中材料控形和改性的不同要求,并组成相互关联的一个

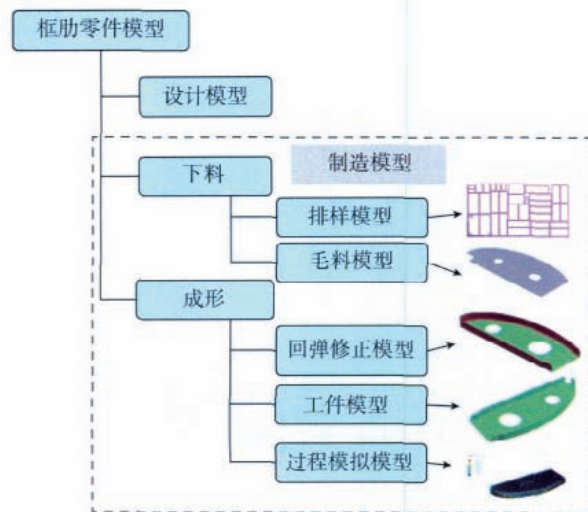


图2 飞机框肋零件制造模型实例

整体。飞机框肋零件工艺链关键节点及制造模型如图 2 所示。

制造模型作为设计与制造的桥梁,是进行工艺过程设计、工艺装备设计和工序件检测的基本依据,具体包括:一是用于工艺装备设计,包括生产工艺装备和检验工艺装备的设计,如模具、夹具、卡具、检验样板等;二是用于工艺参数和数控程序设计,如钣金成形工艺参数设计、复合材料成型工艺参数设计、数控加工刀位轨迹生成等。

## 零件制造模型数字化定义

### 1 制造模型的组成分析

在从原材料到成品件的工艺链中某一时刻的信息是零件在制造过程中的状态,简称为零件制造态。如图 3 所示,在工艺准备的数字空间内,制造态的信息衍化过程对应于材料转变为成品件的加工过程。要实现精密、快速和低成本制造的目标,零件制造态分为以下 2 种类型:一是包含控形节点所要达到的形状,称为工件模型;二是由制造工艺所需,为了制造形成工件形状而又不同于工件形状的状态,称为工艺模型<sup>[3]</sup>。以图 2 所示零件为例,工件模型反映工序过程中所加工出的工件外形,含有为满足加工需要而添加的工艺孔、工艺耳片、工艺余量等,工艺模型则是为了获得工件模型所表达的工件,综合考虑回弹等效应而设计的,用于工艺参数设计、工艺过程分析、工装设计制造的模型。

(1) 工件模型:反映在该工序内通过制造工艺所要形成的工件形状

和性状(表 1)。对于控形、改性工序,其输入是前一工序的输出工件。工件在工艺过程的物流中显式地存在。

(2) 工艺模型:在某些类型零件的控形节点中,要达到节约和精确制造的目标,工装设计、工艺参数设计和数控编程的依据并不是工件形状,而是一个根据输入和输出状态并考虑工艺因素而生成的几何模型,即工艺模型(表 2)。

### 2 制造模型数字化定义

由于工艺链各控形节点本身的关联性决定了零件制造模型组成的各个制造态之间相互关联。制造模型定义采用“状态划分—几何模型定义—几何模型优化”的迭代模式。制造模型定义依赖于长期生产实践中积累的大量工艺知识。因此,CATIA 等设计软件、ABAQUS 等有限元分析软件可以从国外引进,而复杂零件制造工艺设计软件、工艺知识库等绝对保密。通过建立基于知识的制造模型状态划分、状态几何模型

表1 零件工件模型

模型类型	实例说明
毛坯	机加零件:采用铸造、锻造等方法制备的毛坯,与零件结构相似、局部尺寸有变化,毛坯大小影响材料利用率和成本
	钣金板材零件:把零件通过展开成平板件的毛坯,毛坯形状影响零件的可成形性和形状准确度
中间工序件	复杂机加零件:多道工序进行装夹,需要因工序变化而变化的工件模型,以真实反映材料切除过程及实际的定位装夹方式、工件受力、受热变形等对加工精度的影响 <sup>[4]</sup>
	双曲率外形蒙皮:如马鞍形蒙皮,采用数控拉形。若零件变形程度超过了材料许可的变形量,则需经过多次材料改性和形状改变,涉及工艺过程成形次数的确定和每次成形工件形状的定义
最终工序件	根据工艺需要而添加工艺凸台、工艺耳片、工艺余量、工艺孔等

表2 零件工艺模型

模型类型	实例说明
用于工艺参数设计	整体壁板:喷丸路径模型,根据路径内的等强度区域设计工艺参数,以实现精密成形
用于成形模具设计	框肋零件:弯边回弹修正模型,考虑回弹后设计模具,以实现零件快速、精密成形
	复合材料零件:变形修正模型,考虑冷缩变形后设计模具,以实现零件快速、精密成形
用于数控程序设计	钣金零件:数控下料工序的排样模型,在板材上定义平板件排布方式,以提高材料利用率和加工效率
用于检验量具设计	模线模型:从工程的角度看,传统的样板在某些场合十分有效,通过定义模线的数字化模型用于样板数控加工,减少中间传递环节

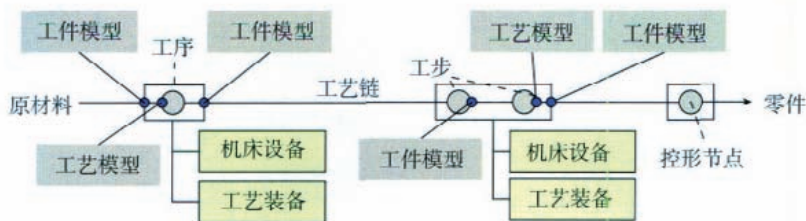


图3 零件工艺链及控形节点对应的制造态

参数设计、工艺性分析与优化的方法,开发各类零件制造模型数字化定义工具。

(1) 制造模型规划:根据零件设计模型和工艺链信息,参照制造模型状态划分的原则与依据,确定制造模型中状态的个数和内容。

(2)几何模型定义:根据状态方案和 design 模型,由不同的部门和角色定义工件模型和工艺模型,以支持工艺和工装设计。各个制造态模型数字化定义顺序与工序顺序不尽相同。

(3)几何模型优化:制造状态定义完成后对状态几何模型进行工艺性分析,对状态几何模型进行优化。制造模型的优化是减少产品研制中反复试错的有效方法。

图4所示为图2所示框肋零件制造模型数字化定义过程和结果,其关键技术包括毛坯定义(复杂曲面展开)、下料工艺模型定义(钣金零件综

合排样)、基于回弹修正的成形工艺模型定义、基于结构要素展开的过渡工件定义等<sup>[5]</sup>。

### 3 制造模型在钣金件数字化制造中的应用

在以模拟量传递为主的制造模式中,零件制造工艺各个环节的工序件没有严密的数字化定义,零件制造准确度难以提高。制造模型是把传统制造模式中以模拟量作为载体的工序件形状和尺寸信息采用数字量表达和定义。基于制造模型的数字量传递与控制的实质是制造模型直接用于成形模具设计、检验工装设

计、制造指令设计、工艺参数设计等环节(应用方案见图5),消除了从检验标准装备到工作装备再到零件的模拟量传递若干中间环节引起的误差,实现精密、快速和低成本的制造,即:工件模型用作标准工装、工作装备等制造依据的数字化定义和模型直接传递,提高制造效率,工艺模型用作成形模具、工艺参数设计和制造操作的依据为优化的工艺模型,实现精密成形,减少反复试错过程和手工校形,降低制造成本,缩短制造周期。

## 结束语

在大飞机数字化制造中,不仅是用数字化的装备改变传统的制造工艺过程,而且新的产品信息模型定义技术同样使制造过程产生重大的变革。本课题提出用 MBD 数据集和 DMM 数据集共同构成面向全数字化制造的产品模型,将改变原有的产品制造技术体系,实现数字化向产品制造过程的延伸。作者在前期针对制造模型数字化定义技术开展了深入的研究,部分航空制造企业也基于制造模型的理念制定工艺规范或设计全三维工艺规程。面向制造的飞机产品模型数字化定义技术在大飞机研制中推广及应用,将有效提升大飞机的数字化制造能力。

## 参考文献

- [1] 王俊彪,刘闯,韩晓宁.面向制造的飞机钣金零件多态模型.航空学报,2007,28(2):504-507.
- [2] 卢鹤,范玉青.飞机结构产品的数字化定义.北京航空航天大学学报,2006,32(5):526-530.
- [3] 卢鹤,韩爽,范玉青.基于模型的数字化定义技术.航空制造技术,2008(3):77-81.
- [4] 王俊彪,韩晓宁,刘闯.飞机钣金零件多态模型几何信息定义方法.西北工业大学学报,2007,25(2):239-244.
- [5] 刘闯,王俊彪,卢元杰,等.面向工艺链的零件制造模型框架研究.计算机集成制造系统,2009,15(6):1070-1074,1139.

(责编 良辰)

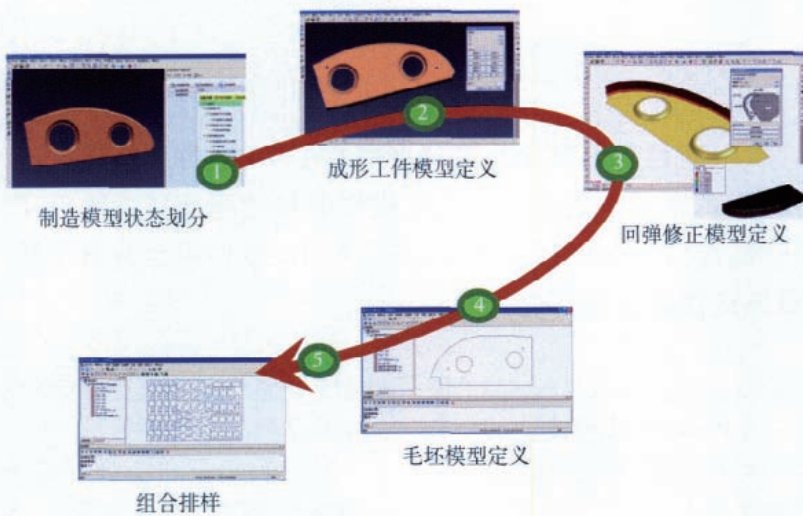


图4 飞机框肋零件制造模型定义实例

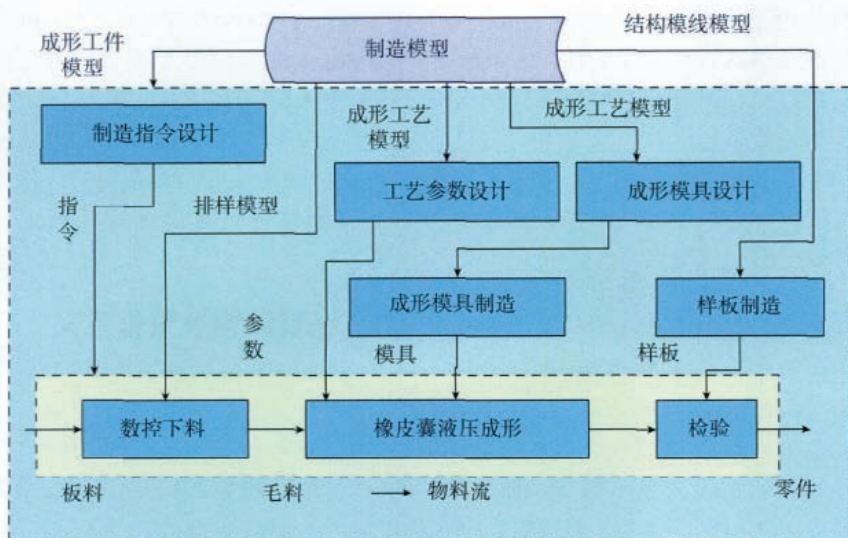


图5 飞机框肋零件制造模型应用方案