

MBD技术发展及在航空制造领域的应用

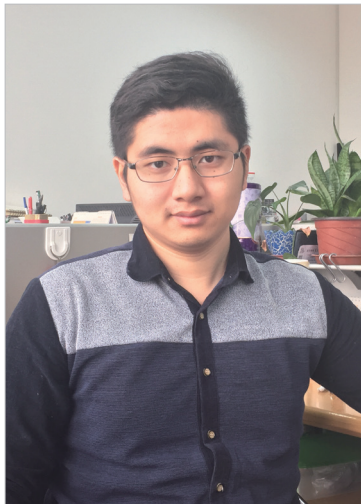
刘睿,段桂江

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院,北京 100191)

[摘要] 作为新一代产品定义技术,基于模型定义(Model-Based Definition, MBD)将设计、制造、检验等制造过程中的全部信息集成于一个综合的产品模型中,并使之成为贯穿制造全过程乃至产品全生命周期的唯一数据源,从而为推进数字化环境下的设计制造检验一体化提供有力支撑。回顾了产品定义方法的发展历史,分析了MBD技术的发展及在航空制造领域的应用现状,探讨了MBD技术的发展方向。

关键词: MBD; 产品定义方法; 航空制造技术

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.05.093



刘睿

北京航空航天大学机械工程及自动化学院博士研究生,研究方向为数字化检测。

基于模型的定义(Model-Based Definition, MBD)技术是将产品的所有相关设计定义、工艺描述、属性和管理等信息都附着在产品三维模型中的先进数字化定义方法^[1]。该方法能够将产品研制过程中的设计、制

造、检验、装配等信息集成在综合的三维模型中,从而使之成为承载产品研制过程的唯一数据源。MBD的出现有效解决了传统二维工程图在现代产品设计制造过程中所面临的复杂产品信息表达与传递困难、产品数据管理繁琐、工程更改难以贯彻等问题,为设计制造过程的集成提供了基于唯一数据源的有效解决方案^[2],在近年来成为国内外研究学者以及制造企业的研究与应用热点之一。

MBD技术在西方工业发达国家的研究与应用已较为普遍。尤其在航空制造领域,部分领先企业已建立相对较为完整的MBD技术应用体系。例如,波音公司成功将MBD技术应用于波音787飞机的研制,在产品数据管理以及设计制造集成方面为787飞机的全世界协同制造提供了技术保障,收到了显著的应用成效。近年来,随着中国航空工业的快速发展,MBD技术在国内航空制造技术领域亦受到广泛关注,并成为研究与应用的热点之一。

本文简要回顾产品定义方法发展历程,对MBD技术的发展与应用现状进行梳理与分析,并对MBD技术的未来发展进行探讨。

产品定义方法的发展

产品定义方法的发展过程可划分为3个阶段:二维定义阶段、二维三维相结合定义阶段以及全三维定义阶段^[3-12]。

产品定义方法各个阶段的特点如表1所示。

(1) 二维定义阶段。

本阶段的产品定义方法以法国科学家蒙日提出的画法几何为理论基础,利用几何投影表达产品的外形,再将产品的制造信息标注在图纸上,形成了经典的二维工程图产品定义方法。此阶段,工程技术人员利用二维图纸表达产品形状,利用二维的公差标注传递制造信息。主要特点是所有的设计制造依据均为二维工程图,但这对产品研制人员的读图技能要求较高,尤其在复杂产品的信息

表1 产品定义方法发展阶段

阶段	描述	优点	缺点
2D	二维工程图定义阶段	单一数据源	信息量有限,表达不直观
2.5D	二维工程图与三维模型相结合定义阶段	解决了复杂形状表达不直观的问题	双数据源
3D	全三维定义阶段	信息量大、数据源唯一、集成程度高	对企业信息化水平依赖性强

传递过程中容易造成理解偏差,出现制造错误。除此之外,二维工程图包含的信息量有限,难以与现代制造过程中的数字化设备集成衔接。

(2) 二维、三维相结合定义阶段。

为了弥补二维工程图在复杂产品形状表达、与数字化制造设备的集成等方面的不足,随着计算机图形学的发展,产品的三维模型被引入到产品定义中,从而形成了二维、三维相结合产品定义方法。此阶段,设计人员除了绘制产品的二维工程图以外,利用三维建模软件建立产品的三维模型。二维工程图作为产品设计制造依据,三维模型作为后续有限元分析、数控编程、测量机编程等环节的参考。部分学者将此发展阶段细分为两个子阶段^[5]:一是规范的二维工程图与三维纯几何模型;二是简化的二维工程图与集成了部分注释的几何模型。这种产品定义方法虽然在一定程度上解决了二维工程图表达能力等问题,但由于出现了双数据源,三维模型与二维工程图同时存在于产品的制造过程中,这给产品数据管理以及工程更改实施带来了困难,容易造成产品版本错误与数据管理的混乱。

(3) 全三维定义阶段。

为了解决双数据源所带来的问题,研究人员将原来在二维工程图中定义的信息逐步转移至三维模型中,利用一个综合的三维实体模型表达产品信息,将产品的设计制造信息(三维尺寸标注及各种制造信息和产品结构信息)集成化地定义到三维数字化模型中,取代二维工程图,作为产品生产过程中唯一的数据源。波音公司在787飞机研制过程中首次

全面应用全三维模型作为产品定义,美国机械工程学会(ASME)于2003年发布了MBD的实施规划ASME Y14.41,达索公司在CATIA软件中提供了符合ASME Y14.41的三维标注功能,是全三维定义阶段的重要标志,此阶段又称MBD阶段。MBD不是简单的三维标注加三维模型,它不仅描述产品的几何信息,而且定义了三维产品制造信息和非几何的管理信息(产品结构、产品制造信息(Product Manufacturing Information, PMI)、物料清单(Bill of Material, BOM)等),是产品生产全过程的唯一数据源^[3,5,11-12]。

随着产品复杂程度的提高,产品定义技术朝着综合化、集成化的方向发展。MBD为产品制造过程提供了综合的三维模型作为唯一数据源,为实现产品生产数据集成与过程集成提供了新的技术手段,对于简化产品数据管理、提高制造效率、降低制造成本具有重要意义。

MBD技术在航空制造领域的研究与应用现状

航空制造领域是MBD技术的重点应用领域之一,国外航空制造领域以波音、空客为代表,已建立了较为完备的MBD技术体系,并在波音787、空客A350等新一代飞机的研制过程中取得了应用。国内航空制造领域在MBD技术的研究与应用方面虽然起步较晚,但近年来大量的学者与企业,在MBD技术的研究与应用探索方面开展了大量的工作,已取得了显著成果。

MBD技术在飞机设计过程中的

应用相对起步较早,并已开始具备一定的工程应用能力,一些飞机设计单位在部分型号研制过程中已开始基于MBD全三维模型进行产品模型定义与发放,部分或完全替代了传统的二维工程图。较之于设计阶段,MBD技术在制造与检验方面的研究应用起步相对较晚。但近年来,特别是在十一五后期与十二五期间,基于多个国家与部委科研项目的支持,一些高校、科研院所和企业相应开展了基于MBD的工艺技术、检验技术研究,并取得初步成效。

就检索到的文献资料来看,目前国内关于MBD技术的研究多数集中于MBD设计规范、MBD环境下的工艺技术以及基于MBD的数字化检验技术等方面。

1 MBD设计技术与规范

设计规范是产品定义方法得以顺利实施的保障。围绕基于MBD的产品定义及其规范,国内外学者与机构进行了大量研究,并取得明显成果。近年来,国内外相关机构已陆续发布了多个MBD设计规范,例如ASME Y14.41以及相关系列、ISO 16792及相关系列,以及我国的数字化产品定义数据通则GB/T 24734系列、机械产品三维建模通用规则GB/T 26099系列、航空制造领域的HB7753~HB7756、航空发动机HB7773与HB7774系列等,已初步建立了MBD的技术规范体系。

在基于规范的模型定义应用技术方面,亦有大量相关工作已经展开,例如,张宝源等^[13]指出了三维标注技术的意义:摆脱二维束缚实现设计制造过程的三维化,以及实现基

于主模型的设计制造一体化,探究了三维标注技术的实现原理,分析了标注技术推行过程可能遇到的障碍并提出了解决思路。周秋忠等^[14]分析了三维标注技术的优点及其对数字化制造技术的影响,以及三维标注技术以属性与标注解决产品非几何制造信息表达问题的本质,结合 CATIA 平台阐述了通过属性与标注表达产品各类非几何制造信息的具体方法,明确了三维状态下产品非几何制造信息的操作管理要求,并通过标注平面对它们进行分类表达,从而实现它们的有效组织与管理。三维标注技术将使三维数字化模型成为数字化产品定义的唯一载体,并成为唯一的制造依据,将引起数字化制造技术的重大变革。高妮萍^[15]提出基于 MBD 的数字化设计信息标注系统,并基于 UG 二次开发了原型系统,在轴类零件上进行了应用验证。郑雷^[16]介绍了基于 MBD 的全三维设计支持系统,基于 CATIA 平台进行二次开发,将技术注释信息集成到三维模型上,实现对全三维设计的支持。梅中义等^[17]对三维环境下的工程注释数据的管理进行了研究,并基于 VBA 开发了 CATIA 工程注释管理软件。潘康华^[18]研究了视图角度、字体与比例、指引线和基准线的表达、尺寸注法、精度特征的表达、剖面线的绘制和图样的简化等三维图样表达相关的关键技术,并分析了当前制造领域主流的三维 CAD 软件的功能,并在此基础上进行了一些二次开发,形成了一套三维标注辅助工具,并在花键套叉零件上展开了应用。

2 MBD 环境下的工艺技术

工艺技术是设计与制造衔接的关键技术。长期以来,航空制造领域在工艺定义与表达方面一直沿用基于二维工程图的传统模式。近年来,随着 MBD 产品定义技术在设计环节应用的日益普遍与深入,一些航空制造企业已陆续开展了基于 MBD 环境

的三维工艺技术研究与应用,并取得长足进展。

在零件加工工艺层面,为实现 MBD 环境下零件级的工艺技术,相关研究人员从零件工艺信息模型构建入手,展开了大量的研究工作。田富君等^[19]提出了以工序模型为基本单位,通过加工特征将几何信息与工艺信息相结合,建立了面向工艺的 MBD 模型;然后以工序模型为载体,建立 MBD 的零件工艺信息模型;采用多视图方法,分别将三维标注信息按照专业类型和工艺规划过程进行划分和管理,并将工序模型进一步划分为实体层、扩展层和应用层;以一端盖零件的工艺信息为例说明了 MBD 的工艺信息模型在三维工艺规划中的应用。韩志仁等^[20]提出了一种 MBD 的零件工艺过程信息表达方法,将设计信息模型与工艺信息模型进行了集成,基于 CATIA 二次开发了原型系统,为开展三维工艺规划提供了基础。伍权^[21]提出将 MBD 设计模型、MBD 工序模型以及工艺属性 3 部分内容进行集成,实现 MBD 的工艺信息模型的定义,并研究其建模方法与三维表达,并以一个典型套类零件作为应用验证。除此之外,亦有大量的研究集中在三维 CAPP 系统的设计与应用方面^[22-27]。在研究过程中,MBD 工序模型的生成一直是研究的难点^[27],虽然已有部分学者在 MBD 工序模型的生成方法取得成果^[28-29],但整体而言,仍需要进一步的研究与应用探索。MBD 环境下零件级的工艺技术目前仍处于理论研究和攻关的阶段,工程应用相对较少。

在 MBD 环境下的装配工艺技术方面,亦取得了显著进展。十二五期间,国内大型航空制造企业在装配工艺模型设计以及工艺规划与仿真方面展开了研究与工程应用,相关工作集中在装配信息的提取与标识、装配工艺模型的快速生成、辅助工艺规划等方面^[30-37]。叶盛等^[33]提出建

立基于 MBD 的三维装配工艺建模系统的技术路线,搭建出系统平台并成功应用于复合材料舱段桁条装配工序的三维建模与仿真。冯廷廷等^[34]研究了装配工艺模型建立的过程,详细描述了工艺设计过程中各阶段的任务及产品信息的数字量传递过程,实现了 MBD 环境下装配工艺设计、工艺仿真及文件输出。胡保华等^[35]研究了基于 MBD 的三维数字化装配工艺设计与可视化技术,开发了软件系统并开展了应用研究。梅中义与郭具涛对 MBD 环境下的装配工艺技术在 实际生产过程中的具体应用模式进行了研究^[36-37]。

3 基于 MBD 的检验技术

基于 MBD 的检验技术是融通 MBD 环境下全三维设计制造集成的关键环节之一,亦是当前 MBD 技术应用的薄弱环节之一。相对于三维设计与三维工艺技术,基于 MBD 的三维检验技术起步较晚。随着基于 MBD 的全三维数字化设计制造技术在飞机型号研制过程中应用的日益深入,对实现全三维数字化设计制造检验一体化的要求日趋紧迫,然而,目前国内航空制造企业的检验部门多数仍采取将三维模型转成二维工程图,再添加公差标注的方式,形成检验的依据。此种工作模式不仅费时费力,破坏了产品模型的唯一性及一致性,易造成模型转换的二义性风险,同时,亦无法适应现代飞机结构对于数字化检验技术的需求。近年来,随着飞机机身结构件日趋复杂化、精密化、大型化,整体结构件、整体壁板等复杂机加结构件大量出现,检验难度、检验项、检验精度要求显著提升,以二维图纸为检验依据,以非数字化检验工具为手段的传统检验技术无论是在检验精度、检验效率、检验能力以及与数字化测量设备的集成能力上均已不能适应飞机结构件高效、高精度检验的需求,航空制造业对加强与提升基于 MBD 数字化检验技术应

用能力的需求日益紧迫。

鉴于上述情况,十二五期间,在相关科研计划的支持下,一批大专院校、科研机构和航空制造企业陆续开展了面向全三维数字化设计、制造与检验一体化应用需求的三维数字化检验技术与探索,并取得一定进展。相关研究与实践工作主要集中在基于MBD的检验模型构建、基于MBD的三维检验规划、检验数据分析与检验数据三维可视化等方面。

基于MBD的检验技术研究的基础与前提是梳理在MBD环境下检验信息的组成及相互之间的关系,构建MBD环境下检验信息模型,作为MBD环境下检验技术的数据基础。北京航空航天大学段桂江等^[38]提出了基于MBD的检验规划统一模型,并基于采用描述文件记录文档路径、文档存储检测相关信息的方式,建立检验规划统一模型所包含信息的内在关联性,以此实现对检验规划工艺数模、检验计划、检测报告等大量文档的归档管理;在检验规划统一模型的基础上,提出了基于MBD的检验规划系统框架,并基于CATIA二次开发了原型系统,并在某型飞机的典型零件框上进行应用验证。郑伟连等^[39]将检验数据融入检验模型中,提出了基于模型的检验数据可视化的方法,而基于MBD检验技术的关键在于将检验信息融入到模型中,并在检验过程中加以利用。为实现三维数字化产品检验,基于MBD的航空产品首件检验方法,在分析MBD技术应用体系的基础上,对航空首件检验标准进行研究,给出了在MBD环境下实现首件检验的关键技术,以探讨实现首件检验过程信息化、数字化的难点和关键点,为基于MBD的航空产品首件检验系统的开发与实施提供了技术支撑和方法指导^[40]。此外,一些学者对基于MBD的检验规划与数字化测量设备的集成衔接及检验数据分析评价等技术进行了

研究^[41-45]。面向飞机机加结构件检验需求的MBD环境下的三维检验规划系统,并在典型的零件上展开了应用验证^[46]。除了对数字化检验技术本身进行研究外,研究人员利用MBD在信息集成方面的优势,将基于MBD的检验技术引入到云制造环境,探索了云检验的应用模式^[47]。方忆湘^[48]、石培玉^[49]等通过分析MBD环境下零件MBD数据集中的测量信息构成,提出了基于零件模型获取零件测量信息的方法,基于NX与Creo二次开发了测量信息获取工具,并进行了应用验证。

MBD 研究与应用展望

在未来相当长的一段时期内,MBD技术将持续成为国内航空制造技术领域研究与应用的热点之一。虽然近年来国内航空制造领域在MBD技术研究与应用方面已开始快速起步并取得了一定的进展,但与波音、空客、洛马等先进企业相比,在理论、方法与工程实践等方面尚存在明显差距,仍有大量工作需要展开。

(1) MBD集成应用方法论方面。

基于MBD的制造技术体系是对传统基于二维工程图制造体系的一场深刻变革,需要有一系列的系统化的理论、方法作为指导^[11-12]。在展开基于MBD的设计、制造、检验等具体技术研究的同时,亦亟待深入开展总体方法层面的研究,例如基于MBD的设计、制造、检验一体化应用体系、方法论、集成框架、工程应用模式等。在总体模型层面,实现基于MBD的产品制造全过程的深度集成,为MBD在工程环境中的实施与应用提供理论指导。

(2) 应用支撑技术方面。

便捷性与易用性是影响MBD技术在工业领域实践应用的关键因素之一。未来应着重于此方面展开支撑技术的研究,例如:基于MBD的设计技术,可将知识库技术引入产

品定义过程,基于知识快速进行产品定义与信息标注,开发高效快捷的三维标注工具有望成为未来MBD的研究热点之一;基于MBD的零件工序模型的生成技术是实现MBD环境的三维CAPP的难点,应加强相关研究;对基于MBD的装配级工艺技术的研究与应用,航空制造企业中已取得部分应用,但复杂产品装配工艺规划、装配模型构建等技术距离工程化应用仍有较大差距,需要继续投入研究力量;基于MBD的检验技术,虽然已有众多研究人员开始关注基于MBD的检验技术,并在检验单项技术,如模型检验信息提取、与数字化检验设备的集成等方面取得了一些研究成果,但尚未形成MBD环境下的检验技术体系,在航空制造企业中基于MBD的检验技术的应用亦处于探索阶段,基于MBD的检验技术的研究依然是MBD技术在设计制造检验全过程的集成应用中的技术瓶颈之一,亟需继续投入研究力量。

(3) 工程应用方面。

虽然目前已建立了MBD技术的国家标准,航空工业亦建立了行业标准,但仍需要在MBD技术的研究与应用过程中逐步完善标准体系,建立适合企业生产情况的技术规范,构建企业知识库,培养相关人才,逐步推进MBD的工程应用。

结束语

MBD将产品设计制造过程中的信息集成在一个综合的三维模型中,使之成为产品制造过程乃至全生命周期的统一数据源,为简化产品制造过程的数据管理、实现产品设计制造全过程的信息融合与过程集成提供有效的解决方案。本文结合产品定义技术的发展历程,对近年来MBD的研究及在航空制造企业中的应用成果进行梳理与总结,并对MBD技术在中国航空制造领域的研究与应

用进行了展望。

参 考 文 献

- [1] 范玉青. 基于模型定义技术及其实施[J]. 航空制造技术, 2012(6):42-47.
- FANG Yuqing. Model based definition technology and its practices[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(6):42-47.
- [2] ALEMANNI M, DESTEFANIS F, VEZZETTI E. Model-based definition design in the product lifecycle management scenario[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011,52(1-4): 1-14.
- [3] PILKAITE T, NENORTA V. Digital product definition data practices[C]// Proceedings of International Conference: Engineering Graphics Baltgraf 2013. Latvia: Riga Technical University, 2013.
- [4] 卢鹤, 韩爽, 范玉青. 基于模型的数字化定义技术[J]. 航空制造技术, 2008(3):78-81.
- LU Hu, HAN Shuang, FAN Yuqing. Model based digital definition technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008(3):78-81.
- [5] 冯潼能, 王铮阳, 孟静晖. MBD技术在数字化协同制造中的应用与展望[J]. 南京航空航天大学学报, 2012,44(4):132-137.
- FENG Tongneng, WANG Zhengyang, MENG Jinghui. Application and development of MBD in digital collaborate manufacturing[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012,44(4):132-137.
- [6] 于勇, 陶剑, 范玉青. 大型飞机数字化设计制造技术应用综述[J]. 航空制造技术, 2009(11):56-60.
- YU Yong, TAO Jian, FAN Yuqing. Summarization of large commercial jet digital design and manufacturing technology application[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(11):56-60.
- [7] SUDARSAN R, FENVES S J, SRIRAM R D, et al. A product information modeling framework for product lifecycle management[J]. Computer Aided Design, 2005,37:1399-1411.
- [8] CABEL J. Model-based definition for the masses[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008,40(5):613-620.
- [9] DINESH D, DAVID A, KOONCE R, et al. Development of a unified data meta-model for CAD-CAPP-MRP-NC verification integration[J]. Computers Engineering, 1997,33(1-2):19-22.
- [10] 周秋忠, 范玉青. MBD技术在飞机制造中的应用[J]. 航空维修与工程, 2008(3):55-57.
- ZHOU Qiuzhong, FAN Yuqing. Application of MBD on airplane manufacturing[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2008(3):55-57.
- [11] PIPPENGER B S. Three-dimensional model for manufacturing and inspection[C]// Proceedings of ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, 2013.
- [12] 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.
- [13] 张宝源, 席平. 三维标注技术发展概况[J]. 工程图学学报, 2011(4):74-79.
- ZHANG Baoyuan, XI Ping. The state of the art of 3D annotating technology[J]. Journal of Engineering Graphics, 2011(4):74-79.
- [14] 周秋忠, 查浩宇. 基于三维标注技术的数字化产品定义方法[J]. 机械设计, 2011(1):33-36.
- ZHOU Qiuzhong, ZHA Haoyu. Digital product definition method based on 3D annotation[J]. Journal of Mechanical Design, 2011(1):33-36.
- [15] 高妮萍. 基于MBD的三维模型设计信息标注系统[D]. 西安: 西安工业大学, 2014.
- GAO Niping. 3D model design information labeling system based on MBD[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2014.
- [16] 郑雷. 基于MBD的全三维设计支持系统的开发与应用[J]. 航空制造技术, 2013(23/24):56-61.
- ZHENG Lei. Application and development of full 3D design support system based on MBD[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(23/24):56-61.
- [17] 梅中义, 杨涛. 基于模型定义的飞机全三维设计实现技术[J]. 航空制造技术, 2013(8):26-31.
- MEI Zhongyi, YANG Tao. Aircraft full three-dimensional design implementation technology based on MBD[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(8):26-31.
- [18] 潘康华. 基于MBD的机械产品三维设计标准关键技术与应用研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2012.
- PAN Kanghua. Research on key technology and application of MBD-based three-dimensional design standards for mechanical products[D]. Beijing: China Academy of Machinery Science & Technology, 2012.
- [19] 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(5):913-919.
- TIAN Fujun, TIAN Xitian, GENG Junhao, et al. Model-based definition process information modeling and application[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012(5):913-919.
- [20] 韩志仁, 张世强. 基于MBD零件工艺过程信息表达方法研究[J]. 制造业自动化, 2013(24):35-37.
- HAN Zhiren, ZHANG Shiqiang. The study on expressing methods for process information of part based MBD[J]. Manufacturing Automation, 2013(24):35-37.
- [21] 伍权. 基于MBD的零件工艺信息模型的建模及工艺性评价[D]. 太原: 中北大学, 2015.
- WU Quan. Modeling and process evaluation of process information modeling based on MBD[J]. Taiyuan: North University of China, 2015.
- [22] 辛宇鹏, 田锡天, 黄利江, 等. 面向MBD环境的三维CAPP技术研究[J]. 航空制造技术, 2015(6):60-63.
- XIN Yupeng, TIAN Xitian, HUANG Lijiang, et al. Research on MBD-oriented three-dimensional CAPP technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(6):38-63.
- [23] 拜明星. 基于MBD技术的三维工艺设计与现场可视化生产[J]. 航空制造技术, 2013(8):38-43.
- BAI Mingxing. 3D planning and visual production based on MBD[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(8):38-43.
- [24] 李海泳, 唐秀梅, 亢亚敏, 等. 基于MBD技术的航空制造数字化工艺实施应用[J]. 航空制造技术, 2013(13):38-42.
- LI Haiyong, TANG Xiumei, KANG Yamin, et al. Application of MBD based digital aeronautical manufacturing process[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(13):38-42.
- [25] 吴建平, 梅中义. 基于MBD的零件数字化工艺设计技术[J]. 航空制造技术, 2013(3):58-61.
- WU Jianping, MEI Zhongyi. MBD-based part digital process design technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(3):58-61.
- [26] 郑雷. 基于MBD三维工艺设计系统的开发与应用[J]. 航空制造技术, 2014(5):52-57.
- ZHENG Lei. Development and application of 3D process design system based on MBD[J].

Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(5):52-57.

[27] 田富君, 陈兴玉, 程五四, 等. MBD 环境下的三维机加工工艺设计技术[J]. 计算机集成制造系统, 2014(11):2690-2696.

TIAN Fujun, CHEN Xingyu, CHENG Wusi, et al. 3D machining process planning technology under model-based definition[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014(11):2690-2696.

[28] 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(10):2112-2118.

WAN Neng, ZHAO Jie, MO Rong. Three dimensional machining procedure model creation methods[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011(10):2112-2118.

[29] 赵鸣, 王细洋. 基于体分解的 MBD 工序模型快速生成方法[J]. 计算机集成制造系统, 2014(8):1843-1850.

ZHAN Ming, WANG Xiyang. Rapid generation of MBD process model based on volume decomposition[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014(8):1843-1850.

[30] 刘晓波. 基于 MBD 的飞机装配工艺辅助系统研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2013.

LIU Xiaobo. A research on the auxiliary system of aircraft assembly process based on MBD[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2013.

[31] 冯廷廷. 基于 MBD 的飞机装配工艺规划与仿真[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.

FENG Tingting. Planning and simulation of aircraft assembly process based on MBD[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.

[32] 陈磊. 基于模型定义的大型客机数字化装配工艺规划技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.

CHEN Lei. Study on digital assembly process planning technology with model based definition in large passenger aircraft[D]. Shenyang: Shanghai Jiao Tong University, 2014.

[33] 叶盛, 唐家霖, 鲍劲松, 等. 基于 MBD 技术的三维装配工艺系统构建及应用[J]. 排灌机械工程学报, 2015(2):179-184.

YE Sheng, TANG Jialin, BAO Jinsong, et al. MBD-based three-dimensional assembly process modeling and application[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2015(2):179-184.

[34] 冯廷廷, 金霞, 王珉, 等. 基于

MBD 的飞机装配工艺模型设计[J]. 航空制造技术, 2010(24):95-98.

FENG Tingting, JIN Xia, WANG Min, et al. Model-based model design for aircraft assembly process[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(24):95-98.

[35] 胡保华, 闻立波, 杨根军, 等. 基于 MBD 的三维数字化装配工艺设计及现场可视化技术应用[J]. 航空制造技术, 2011(22):81-85.

HU Baohua, WEN Libo, YANG Genjun, et al. Model-based three-dimensional digital assembly process design and on-site visualization technology application[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(22):81-85.

[36] 梅中义. 基于 MBD 的飞机数字化装配技术[J]. 航空制造技术, 2010(18):42-45.

MEI Zhongyi. Digital aircraft assembly technology based on MBD[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(18):42-45.

[37] 郭具涛, 梅中义. 基于 MBD 的飞机数字化装配工艺设计及应用[J]. 航空制造技术, 2011(22):74-77.

GUO Jutao, MEI Zhongyi. Design and application of MBD-based aircraft digital assembly process[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(22):74-77.

[38] 段桂江, 岑荣. 基于 MBD 的飞机结构件检验规划技术研究[J]. 航空制造技术, 2015(19):62-67.

DUAN Guijiang, CEN Rong. Research on three-dimensional inspection planning for aircraft structural parts based on MBD[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(19):62-67.

[39] 郑伟连, 杨敏洁, 刘睿, 等. 基于 MBD 的检测数据和三维模型关联与可视化技术[J]. 航空精密制造技术, 2014(6):11-14.

ZHENG Weilian, YANG Minjie, LIU Rui, et al. Method based on correlation of MBD inspecting data and visualization three-dimensional model[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2014(6):11-14.

[40] 杜福洲, 梁海澄. 基于 MBD 的航空产品首件检验关键技术研究[J]. 航空制造技术, 2010(23):56-59.

DU Fuzhou, LIANG Haicheng. Research on key technology of MBD-based aviation first article inspection[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(23):56-59.

[41] DUAN G J, ZHAO J A. A method of knowledge based measurement points distribution in three-dimensional inspection planning[C]// Proceedings of the 2015 International Industrial Informatics and Computer Engineering

Conference. Xi'an, 2015: 1339-1342.

[42] DUAN G J, ZHANG P. Research on measurement points planning based on structural features of parts[C]// Proceedings of the 2015 International Industrial Informatics and Computer Engineering Conference. Xi'an, 2015: 1343-1346.

[43] DUAN G J, GAO S. Research on simulation and collision check in three-dimensional inspection planning[C]// Proceedings of the 2015 International Industrial Informatics and Computer Engineering Conference. Xi'an, 2015: 1347-1350.

[44] DUAN G J, REN Y. A method of inspection feature evaluation based on DMIS[C]// Proceedings of the 2015 International Industrial Informatics and Computer Engineering Conference. Xi'an, 2015: 1351-1354.

[45] 郑伟连, 杨敏洁, 刘睿, 等. 一种直接基于三维 CAD 模型的复杂曲面轮廓度误差评定方法[J]. 航空精密制造技术, 2014(5):14-17.

ZHENG Weilian, YANG Minjie, LIU Rui, et al. Evaluation method of complex curved surface profile error based on three-dimensional model[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2014(5):14-17.

[46] 张江, 段桂江. 面向飞机结构件的三维检测规划系统研究与开发[J]. 航空精密制造技术, 2012,48(5):30-32.

ZHANG Jiang, DUAN Guijiang. Research and development on the three-dimensional inspection planning system for aircraft structural parts[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2012,48(5):30-32.

[47] 刘睿, 段桂江. 面向云制造服务可信性评价的云检验技术研究[C]// 2015 中国智能物联系统会议论文集, 2015.

LIU Rui, DUAN Guijiang. The cloud based inspection for dependability evaluation in cloud manufacturing environment[C]// Proceedings of the 2015 Chinese Intelligent Networked Things Conference, 2015.

[48] 方忆湘, 刘恩福, 高婷, 等. 基于模型定义的零件数据集三坐标测量信息获取[J]. 计算机集成制造系统, 2013(7):1532-1540.

FANG Yixiang, LIU Enfu, GAO Ting, et al. Coordinate measuring information extraction of parts based on MBD dataset[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013(7):1532-1540.

[49] 石培玉. 基于 MBD 的复杂零件测量信息识别与获取技术研究[D]. 石家庄: 河

(下转第 109 页)