

飞机结构件数字化设计与制造技术

帅朝林

(中航工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610092)

[摘要] 飞机结构件逐步向大型化、整体化和复杂化发展,且制造精度要求较高。对设计和制造技术提出了更高的要求。因此,开展飞机结构件设计技术和制造技术的研究,在飞机结构件设计和制造过程中应用数字化技术和智能技术,构建飞机结构件设计制造协同化平台,实现飞机结构件高效、高质、低成本和环保的柔性化设计和制造,对企业核心竞争力具有重要意义。

关键词: 飞机结构件;面向制造的设计;高效加工;智能管控;协同

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.1/2.048



帅朝林

博士、研究员级高级工程师。中航工业成都飞机工业(集团)有限责任公司副总经理、总工程师。中航工业航空制造技术首席专家,研究方向:飞机数字化设计与制造技术。

航空制造业作为装备制造业的典型代表,是战略性高科技产业,体现一个国家的综合国力及整体工业水平,是中国制造 2025 重点支持的

十大领域之一。飞机结构件的高效、高质量的设计与制造是保证飞机性能和研制进度的重要条件。它不仅要求将数字化技术简单的组合应用到飞机结构件的设计与制造中,更强调设计与制造的协同性,即以产品目标为驱动,采用智能控制系统将实时的、分散的设计信息和制造信息采集、优化处理和集成,以更好地服务于产品的设计制造全流程。因而,如何将飞机结构件的设计过程和制造过程融合,基于智能技术定义新时期飞机结构件的设计和制造体系是我国装备制造业的迫切需求。

自 2011 年德国汉诺威博览会上首次提出的以智能制造为主导的第四次工业革命(Industry 4.0)以来,其他国家也先后针对智能制造提出了相应的发展计划,如美国重振制造业战略、日本制造业白皮书和中国制造 2025。可见智能制造正成为新一轮产业竞争的制高点,得到世界各国高度重视。飞机结构件是典型的小批

量、多品种的生产模式,不利于知识的积累和重用。因此,在飞机结构件的设计和制造过程中运用智能技术具有重大而现实的意义。

国内外研究现状

美国洛克希德·马丁公司在 JSF 项目中以产品全生命周期管理(PLM)软件为集成平台,以数字化的设计制造管理方式,改组公司流程,充分发挥合作伙伴的最优能力,使 JSF 飞机设计时间减少 50%,制造时间减少 66%,总装工装减少 90%,分立零件减少 50%,设计制造、维护成本分别减少 50%。波音公司在新一代战神航天运载工具的研制中,通过采用 MBD/MBI(基于模型的定义和基于模型的作业指导书)缩短装配工期 57%,将数字化制造推向制造现场的更深层次。并且实现了以下技术突破:3D 模型的可制造化,3D 设计向 3D 工艺的转换,将 3D 的产品和工艺信息向制造单元工人传递,制造作业

现场的数字化数据采集和反馈,数字化质量和依从性文档的管理等。

国内航空制造企业紧跟世界先进航空制造企业的技术发展,通过近十几年的持续投入,已基本实现了产品的数字化设计及基于模型的制造过程,关键零件制造已基本实现了加工过程数控化^[1]。国内先进航空制造企业已初步建成数字化车间环境,开发了系列的业务系统及软件工具,实现了部分制造过程的数字化管控,局部水平已基本接近国际航空制造企业先进水平,已经具备了从数字化向自动化、智能化制造发展的基础。但和国外先进水平相比和从技术发展趋势来看,现有的飞机结构件加工车间在集成度、柔性化、智能化方面还处于初级阶段,主要还是依靠单台加工设备的先进性和自动化程度,实现飞机结构件的高效加工。

面向制造的飞机结构件设计技术

基于MBD的全三维设计技术虽然在国内的飞机设计过程已逐步应用,改变了飞机产品的研制方法,缩短了飞机产品的研制周期^[2]。但还存在飞机结构件设计过程注重功能性,缺乏对其可制造性的考虑的问题,使设计过程和制造过程出现断裂,增加了产品的制造难度和生产成本。而且,飞机结构件多品种、小批量的制造特点,难以通过单件大量的生产模式进行知识的积累和重用,所以,建立飞机结构件的设计和制造知识的获取、重用和融合技术,才能打破两者之间的信息阻隔,在飞机结构件的设计过程中就考虑它的可制造性,实现面向制造的智能设计。而面向制造的设计的核心在于知识的获取、表达和建模技术。

1 制造工艺知识的获取与表达

飞机结构件的加工工艺复杂,如何准确、完整地获取与表达飞机结构件的加工工艺知识,对促进飞机结构

件设计过程的智能化极其重要。虽然,飞机结构件整体的加工工艺知识复杂、繁多,但其绝大数的工艺知识都与零件的组成特征相关。特征技术作为一种数字化制造的手段,在信息集成方面发挥了重要作用,在传统的研究与商业软件的应用中,特征技术已广泛应用在CAD/CAM领域。特别是它在CAM领域发挥的作用已被广泛认可,它能有效地提高工艺员的编程效率,有利于知识的集成和共享,提高零件的加工效率和加工质量等等。但如何将特征技术作为设计过程和制造过程的纽带仍是值得探讨和关注的重点。

特征是一组具有特定属性相互关联的几何形状,包括零件形状、工艺和功能信息等的综合描述,是集成设计和制造信息的最佳载体,可以有效地提高产品的设计的自动化程度。特征可以将信息传递到下游的制造过程中,成为沟通设计、工艺和加工过程的纽带。通过建立基于特征的工艺知识获取和表达模型,以特征作为知识的载体,构建面向设计的特征工艺知识库,实现在设计过程和制造过程中知识的共享,为面向制造的飞机结构件设计提供了依据。

改变传统的以生产任务为主,不注重控制生产成本的的模式。特别是在飞机结构件,其材料费用昂贵,加工周期长。不合理的设计极易导致产品的质量难以控制,增加了产品的加工难度和生产成本。急需适合飞机结构件的快速、优质的设计方法,以提高飞机制造业的核心竞争力。

飞机结构件虽然外型结构较为复杂,但特征技术在设计和制造过程中被广泛运用^[3]。飞机结构件中的特征类型从几何形状上可以分为槽特征、筋特征、孔特征和轮廓特征,我们将其定义为几何特征。飞机结构件设计过程中,不仅需要定义零件的几何形状,还包括零件的技术、材料、精度等等参数信息,我们将其定义为过程特征,其是零件加工和检验的重要依据。图1所示为面向制造的飞机结构件设计方法。在飞机结构件设计过程中,结合MBD全三维建模思想,利用可参数化的特征建模技术和基于特征的工艺知识解释器,在进行几何特征构型和过程特征标注时,充分融入飞机结构件的加工工艺知识,使设计过程就是制造过程,真正实现了飞机结构件的智能设计。

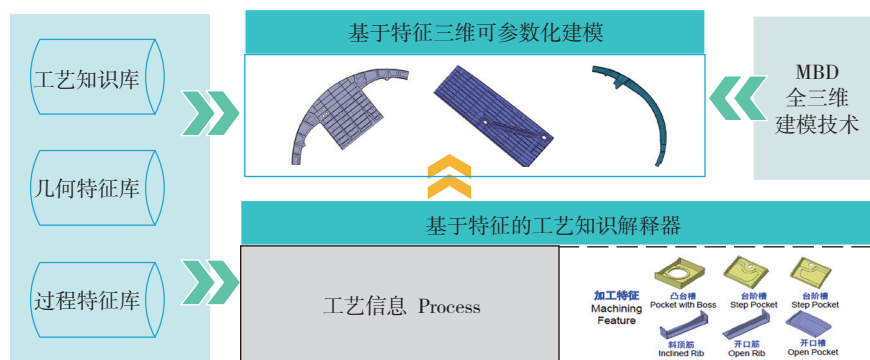


图1 面向制造的飞机结构件设计方法

Fig.1 Design method for manufacturing process of aircraft structure part

2 基于特征的三维模型参数化设计

飞机是多种高科技的集成体,代表着一个国家工业的设计、制造和装配水平。随着全球经济增速放缓,制造业的发展进入艰难时期,企业需要

飞机结构件高效数字化加工关键技术

现代飞机结构件大量采用整体化设计方式,其结构复杂、特征种类多,制造难度较大^[4-5]。经过多年的

技术研究与应用,飞机结构件制造过程部分实现了数字化,但和国外先进技术相比,仍然存在如下问题。大型飞机结构件的数控编程周期长,编程质量低。加工中容易产生变形,变形控制难度大,加工效率不高。难加工材料零件的质量控制难度大。总之,飞机结构件的加工仍然非常依赖人员经验,在加工中需要不断的人工干预和控制,阻碍了自动化的实施^[6]。因此,开展飞机结构件的制造过程中自动化及智能加工技术的研究,实现飞机结构件柔性化制造,对提高飞机制造业的技术水平具有重要意义。

1 集成化工艺编程平台

飞机结构件工艺编程的效率和質量已成为飞机结构件加工周期的重要瓶颈之一^[5]。牟文平等^[5]提出了面向航空复杂结构件的用户自定义加工特征建模方法和基于全息属性命名图的加工特征识别方法,开发了基于特征的智能编程系统,实现了飞机复杂结构件的智能编程。该系统能够实现飞机结构件加工特征的自动识别,以工艺知识库、切削参数库和制造资源库为支撑平台,自动完成飞机结构件加工工艺规划及数控加工程序的编制、检测数据的生成和检测轨迹的规划,为飞机结构件工艺设计需求提供完整的工艺解决方案。该系统对典型特征的识别率高达95%以上,编程效率提高了3倍以上。随着系统功能的扩展,基于特征的智能编程系统将发展成为工艺准备过程中的一个集成平台,囊括工艺审查、特征识别、工艺决策、刀轨生成、后置处理和仿真优化等飞机结构件工艺编程的所有环节。同时,随着工艺知识库、切削参数库和制造资源库等的不断改进与完善,未来的飞机结构件编程任务将全部由计算机完成,显著的缩短工艺准备时间,以满足智能加工高度柔性化的需求。工艺人员也将从繁重的工艺编程任务中解放,转为进行工艺技术的研究和

工艺知识的维护、更新。

2 数控设备的自动化性能评估与保障技术

数控机床被誉为工业的母机,其本身的性能和运行状况良好与否将直接影响飞机结构件的加工质量和加工时间。特别是在无人工干预要求下,对机床设备精度、性能和故障的实时预测评估、分析处理提出了更高的要求。

机床的精度是飞机结构件加工质量的重要保障条件。传统的机床精度评估方法存在问题:一是检测时间长,需要后期进行大量的数据分析;二是无法实现机床精度的实时在线补偿,需要人工干预。德国DST机床公司开发了一套机床精度自诊系统(SQS),该系统通过运行一套预先设定的标准测试程序,快速

杂的系统,如果能及时对机床的故障进行预测和预先维修将会极大地提高机床利用率。数字化车间环境下将先进制造技术、信息技术和智能技术进行了集成和深度融合。图2为机床远程状态监控方法,通过网络传感器系统,实时采集机床设备电气、机械等功能部件的振动、电流、噪音等信号,实现对自身状态、环境的自感知。利用工业以太网,将感知信号传递到管控系统。管控系统根据收到的信号,在专家知识库的支持下,利用神经网络等推理算法,对关键功能部件的健康状态进行预警和决策。机床设备接受到决策信息后,自适应地调整自身运行模式,或由维修人员进行维护。减少因机床故障造成产品质量事故和停工的情况,满足飞机结构件数字化车间智能生产模式需要。

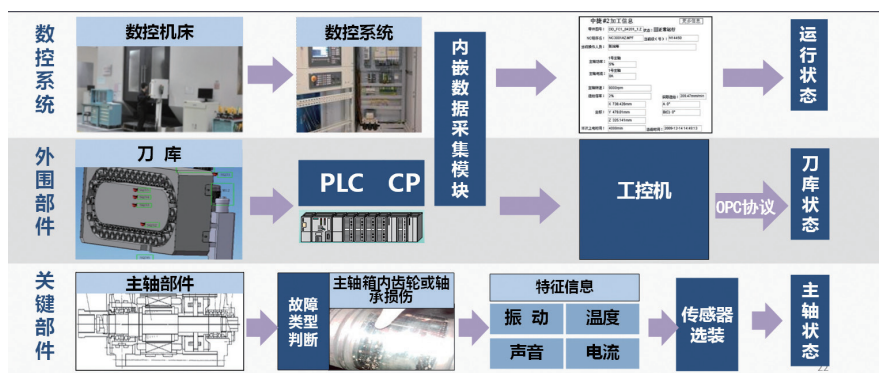


图2 数控机床远程状态监控

Fig.2 Method of remote condition monitoring for CNC machine tool

地对机床的空间精度和五轴联动精度进行自动的检测补偿,并对补偿后的空间精度进行计算和评估。其主要通过光学原理来检测机床坐标轴移动过程中的空间误差和R-TEST来检测旋转头的姿态误差。DST开发的这套机床精度自诊系统能在30min内完成对机床精度的自动检测和补偿,在智能制造条件下,实现机床精度变化的实时跟踪。将其与车间信息系统集成,及时更新制造资源库,为飞机结构件加工时机床的选择提供依据。

数控机床本身就是一个非常复

3 加工过程自适应控制技术

飞机结构件加工质量和加工效率不仅与机床设备、加工程序有关,还涉及到刀具、装夹以及检测和变形控制等等技术。未来的智能加工工厂中自适应装夹夹具、实时加工过程监控和加工检测一体化技术将是智能的柔性化生产线的重要组成部分。

自适应装夹夹具能随着加工过程零件的变形情况的自适应的调整夹紧力,在基于特征中间加工状态评估加工过程中特征的刚性的基础上,结合实时监测的切削力调整夹紧力。保证夹紧力与工件的刚性状态以及

切削力相匹配,防止工件变形。同时,为适应柔性化生产无人工干预的生产模式,根据结构特征对飞机结构件进行分类分组,并从加工工艺性和结构尺寸等方面综合考虑,通过标准化的快换工装模块,实现不同规格零件及其专用工装在不同机床上的加工,以适应数字化车间飞机结构件的自动化生产模式。

目前,国外已形成多套商业化监控系统,但对加工状态的识别仅基于监控信号,在飞机结构件等复杂零件的加工过程中易受加工状态波动的影响,频繁产生误报警而影响正常生产。需要对数控系统远程监控技术进行深入研究,实时监测主轴切削功率,并结合工艺信息对加工状态进行识别,如发现异常加工状态,立即控制机床停止加工,防止刀具磨损破损、刀轨错误等原因造成的零件质量缺陷,提升加工状态识别准确率。

检测加工一体化技术主要是在零件装夹或加工完成后,利用机床自带的检测系统对零件的空间位置和特征尺寸进行测量,根据测量结果分析误差分布情况,重新调整加工坐标

系和加工程序对零件进行再加工,以保证设计要求的技术。保证了柔性生产线中零件的加工质量,减少因零件装夹、工装定位、零件加工变形等因素引起加工状态变化而造成的加工超差。

4 制造过程的智能化生产管控

智能生产管控中心是未来飞机结构件加工工厂的大脑,集数据收集、分析、自主决策等功能于一体,负责工厂所有资源的统一调配和管理。以数字化生产管理体系为支撑,实现飞机结构件数控制造生产管控、作业调度、现场管理及制造资源管理等全要素的智能管控。在此基础上,打造与实际工厂同步运行的虚拟工厂,对排产计划在虚拟工厂进行模拟运行,以确定排产计划的有效性。同时,不断将实际工厂的运行信息传输到智能生产管控中心来驱动虚拟工厂的运行,智能生产管控中心将根据虚拟工厂的运行反馈信息进行决策,以实现对实际工厂的调度控制。智能生产管控中心有效地延伸了人类大脑的作用,对实现飞机结构件加工过程中无人工干预或少人工干预具有巨

大的促进作用。

飞机结构件设计制造协同化平台

现代的飞机研制一般采用多制造商、异地协同研制的模式。飞机结构件小批量、多品种的生产模式,特别是在研制、生产过程中,伴随着大量的设计更改,所以要求制造过程能够快速地对设计更改作出响应,包括制造厂家的选择,工艺和资源的准备等等。同时,在传统的飞机结构件研制流程中,设计过程和制造过程是相对独立的,只有设计向制造的单向模型数据传递,制造过程的数据却无法向设计反馈。因此,在数字化技术的基础上,建立飞机结构件设计过程和制造过程的多元化信息沟通渠道,构建飞机结构件设计和制造协同化平台,实现多部门、多地的飞机结构件全生命周期的数据共享,才能真正做到设计协同化、制造协同化、设计和制造的协同化。

从协同研制全局目标看,产品数字化协同研制中有横向(多学科协同研制 MDO)和纵向(产品全生命周

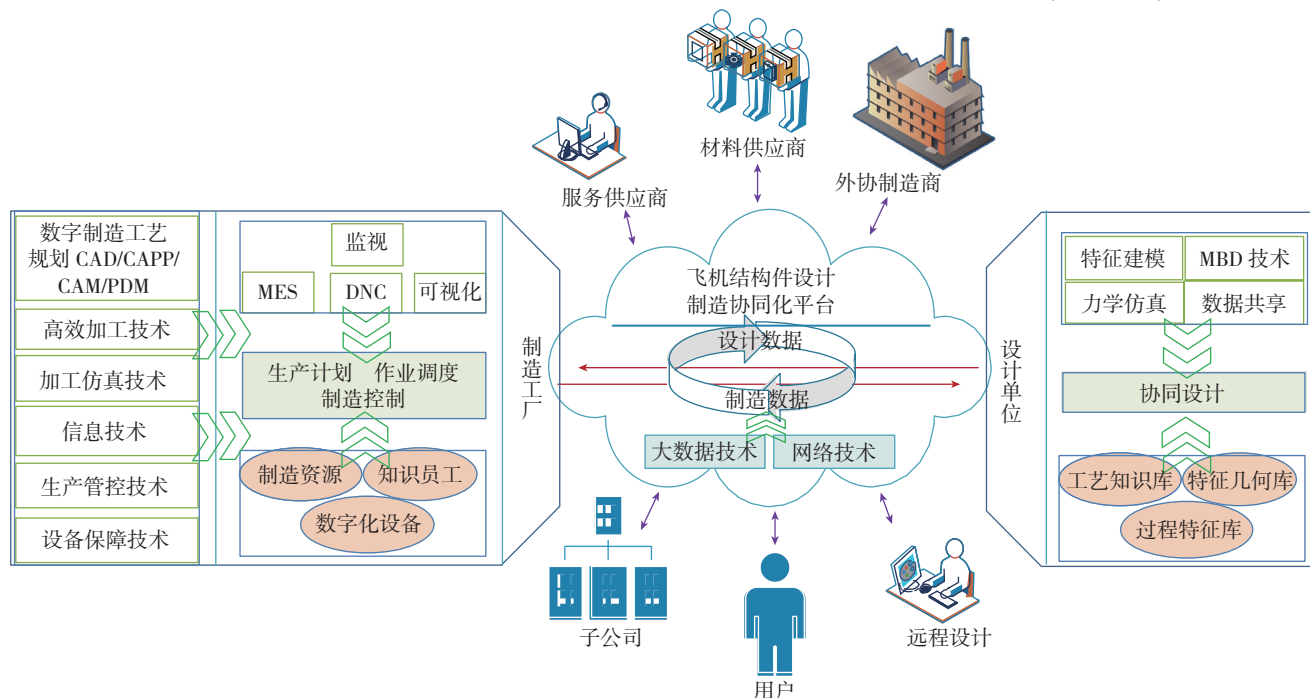


图3 飞机结构件设计与制造协同化平台

Fig.3 Design and manufacturing collaborative platform for aircraft structure part

期的协同)两种模式^[7]。空客公司在VIVA CE(Value Improvement through a Virtual Aeronautical Collaborative Enterprise)系统研究项目中,从可行性研究、概念设计直到详细设计的全生命周期里进行了协同化技术应用性研究,构建了多学科协同研制MDO的系统框架,在直升机、飞机和发动机3个航空领域进行了应用。在空客A380的研制过程中,就充分利用了多学科协同研制的思想进行飞机的设计。这些数字化协同研制方法都只是实现了数据从上游至下游的单向传递或同级之间的横向传递,缺乏下游对上游的数据反馈。

大数据技术和网络技术的发展为协同平台构建提供了基础条件^[7],在协同平台中,分属不同层级、不同地域设计部门和不同地域制造商的软件资源(CAD、CAE软件)、硬件资源(数控设备、检测设备)和知识资源(工艺知识库、参数库等)实现横向和纵向的共享,设计制造过程的智能调度协调和数据的直接传递,快速地完成飞机结构件的设计、制造过程,实现分布资源的同步参与。同时,飞机结构件制造过程中的数据可以利用协同平台快速的及时反馈给设计部门,指导和优化飞机结构件的设计过程,提升飞机结构件的可制造性,缩短飞机结构件乃至飞机产品的

研制周期。图3所示为飞机结构件设计与制造协同化平台体系。

结束语

数字化技术在飞机结构件的设计和制造中的应用有效地提高了飞机结构件的加工质量和加工效率,但飞机结构件小批量、多品种的生产模式不仅仅需要质量和效率的提升,更需要柔性化、自动化。未来飞机结构件的设计和制造应该逐步向智能化发展,打破传统认为的设计和制造过程是分离的认知观念,构造飞机结构件设计制造协同化平台,利用面向制造的智能化设计和智能加工工厂,实现飞机结构件高效、高质的柔性化自动生产。但智能制造需建立在高度集成的自动化生产的基础上,国内的航空企业离这一要求还有很大的差距。当务之急是开展飞机结构件智能设计和智能加工相关关键技术的研究,推动相关技术和标准体系的应用,实现智能制造在飞机结构件设计和制造领域的落地。

参考文献

[1] 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. The review of large aircraft digital design and manufacturing technology[J]. Aeronautical

Manufacturing Technology, 2009(11):56-60.

[2] 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.

FAN Yuqing. Model definition based technology and its application[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(6):42-47.

[3] 程学朋.基于特征的三维模型参数化设计[M].沈阳:沈阳理工大学,2012.

CHENG Xuepeng. Feature based parametrization design for 3D model[M]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2012.

[4] 杜宝瑞.飞机结构件数控加工之“未来工厂”[J].航空制造技术,2014(14):41-45.

DU Baorui. The "future factory" for aircraft structure part nc machining[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(14):41-45.

[5] 牟文平,隋少春,李迎光.飞机结构件智能数控加工关键技术研究现状[J].航空制造技术,2015(13):56-59.

MOU Wenping, SUI Shaochun, LI Yingguang. The research status of intelligent CNC processing key technology for aircraft structure part[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(13):56-59.

[6] 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):45-50.

FENG Tongneng, WANG Zhengyang, MENG Jinghui. The application and prospects of MBD technology in the digital collaborative manufacturing[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 44(4):45-50.

[7] 周乐,双海军.网络化协同设计与制造平台[J].兵工自动化,2006(10):25-29.

ZHOU Le, SHUANG Haijun. The platform for networked collaborative design and manufacturing[J]. Ordnance Industry Automation, 2006(10):25-29.

Digital Design and Manufacturing Technology for Aircraft Structural Parts

SHUAI Chaolin

(AVIC Chengdu Aircraft Industrial(Group)Co. Ltd., Chengdu 610092, China)

[ABSTRACT] This paper presents the digital design and manufacturing technology for aircraft structural parts since the aircraft structural parts is becoming large-scale, integrated and complicated, and the requirement of manufacturing accuracy is higher, which take challenge for design and manufacturing technology. The application of digital technology and intelligent technology in the process of aircraft structure part design and manufacturing, and building the design and manufacturing collaborative platform for aircraft structure part to realization high efficiency, high quality, low cost, environmental protection and flexible design and manufacturing of aircraft structural parts is of great significance to improve the enterprise core competitiveness.

Keywords: Aircraft structural parts ; Design for manufacturing process ; High efficiency machining ; Intelligent management and control ; Collaborative

(责编 宁宁)