

数字化装配在航空发动机装配中的应用研究

Research on Application of Digital Assembly in the Assembly for Aeroengine

中航工业沈阳发动机设计研究所 刘超 赵洪丰 胡一廷

[摘要] 研究了数字化装配在发动机装配工艺设计中的应用,提出了数字化环境下发动机装配工艺设计的工作流程;引入结构化设计思想,将产品、工艺、资源三者关联,构建了装配工艺模型,并以发动机装配工作为例,对数字化装配工艺设计进行了实例验证。

关键词: 数字化装配 装配工艺模型 发动机装配工艺设计

[ABSTRACT] The digital assembly technology in the assembly process design for aero-engine is researched. The workflow of assembly process design for aero-engine in the Digital Environment is proposed. Assembly process model is constructed by associating product, process, resource, with structured design. Example of assembly work for a type of aero-engine proved the Digital Assembly process design for aero-engine.

Keywords: Digital assembly Assembly process model Assembly process design for aeroengine

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.21.046

航空发动机装配是发动机研制的重要组成部分,其装配工艺复杂、涉及学科广,对发动机制造效率、质量和成本有很大影响。因此,发动机装配在发动机研制过程中占有十分重要的地位^[1]。目前,我国航空发动机的设计制造还未达到研制并行阶段。在产品的设计过程中,设计单位在三维CAD软件(如UG)中完成设计,而其中大量关键制造数据仍通过二维图纸输出到制造单位,还没有形成完整的基于三维模型的设计制造体系;以二维图纸为主开展的装配工艺规划给虚拟仿真和分析测试带来了不便。

在飞机研制领域,基于模型的定义(Model Based Definition, MBD)这种数字化产品定义技术目前正得到广泛应用。波音公司在以波音787为代表的新型客机研制过程中,全面采用了MBD技术,开创了飞机数字化设计制造的崭新模式,建立了三维数字化设计制造一体化集成应用体系,使得研发周期缩短了40%,工程返工减少50%,带来了巨大的效益^[2-3]。在国内飞机研制进程中,脉动生产线、柔性装配体系等设计模式也在逐步推行,基于CATIA、UG、Pro/E的全三维设计规范也在不

断完善^[4]。

本文借鉴飞机研制过程中的基于MBD技术的数字化设计研制体系,根据航空发动机产品特点,构建了以产品-工艺-资源(Product-Process-Resource, PPR)核心模型为基础结构的装配工艺模型,引入了基于MBD模型的航空发动机数字化装配工艺设计技术。

1 基于MBD的数字化装配工艺

1.1 MBD的内涵

MBD是一种面向计算机应用的产品数字化定义技术,其核心思想是用一个集成的三维实体模型来完整地表达产品定义数据,它通过实体模型和文字表述等方式,包含了产品所有的物料信息及其物理和功能需求,并应用三维标注明确了三维实体模型中产品的尺寸公差等几何信息,以及制造技术要求等产品非几何制造工艺数据^[5-6],其数据结构如图1所示。

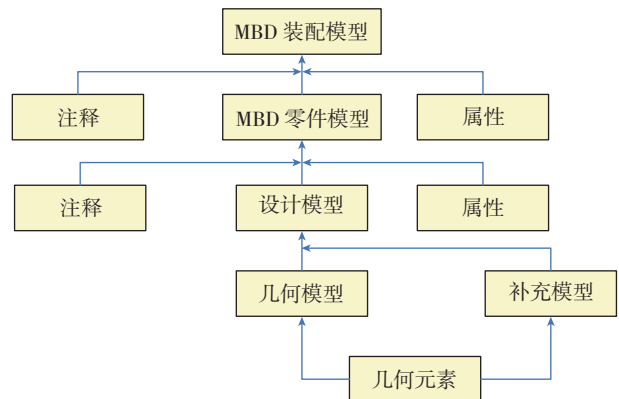


图1 MBD模型的数据结构
Fig.1 Data Structure of MBD model

1.2 装配工艺工作流程

数字化装配工艺以MBD模型为基础,通过EBOM向PBOM转换,完整地继承了上游三维设计数据,也实现了工艺数据的继承性、规范性和标准化表达,缩短了工艺设计周期,有效地减少了返工量,提高了工艺设计对生产现场的可指导性^[7]。发动机装配过程中,数字化装配工艺设计系统与数据管理系统(PDM)、生产现场管理系统(AMRO)集成,构建了装配工艺工作的数字化协同平台。

基于 MBD 的数字化装配工艺设计工作,首先在协同平台上接收 MBD 模型包含的数据信息,构建数字化装配工艺模型,以此为数据基础进行装配工艺设计、管理工艺数据、编制规范制度,最终将直观、准确的数字化装配规程发放到装配现场。数字化协同平台环境下的装配工艺设计方案见图 2。

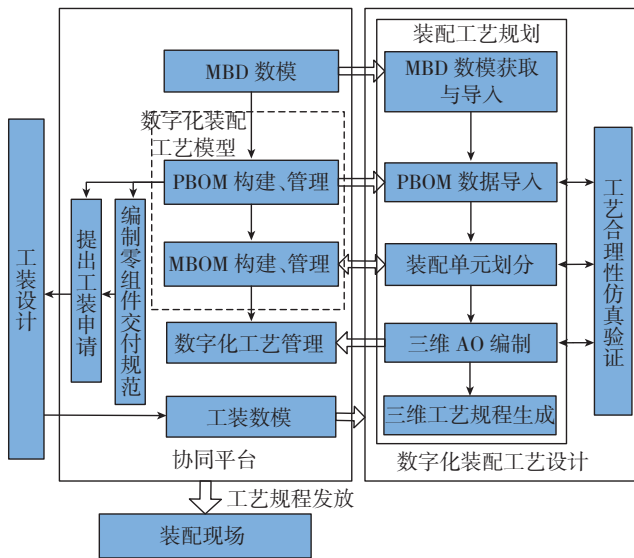


图2 数字化装配工艺设计流程图
Fig.2 Workflow of digital assembly process design

2 数字化装配工艺模型

发动机装配工艺规划是针对发动机产品结构特点、结合发动机装配要求、明确装配过程所需资源、规划一系列装配操作及其顺序和路径的工艺过程。装配工艺模型是装配工艺规划的基本数据载体,为装配工艺规划过程提供完整的数据支持^[8]。

数字化发动机装配工艺规划通过引入 PPR 模型实现结构化设计。PPR 模型由相互联系的产品、工艺、资源构成。产品、工艺、资源分别为树状的结构化数据。

装配工艺模型不仅是产品结构的静态描述,而且存储了满足装配这一过程性操作的各种数据,包含了装配工艺规划中数据获取和利用所需的产品信息、工艺信息和资源信息。装配工艺模型作为一个整体,它既是信息的接受者和使用者,同时又是信息的发布者和生产者。一方面,在装配工艺驱动下,它将获取的各种所需信息整理、融合到模型中;另一方面,工艺规划过程中,它又作为一个信息载体向各个步骤和环节输出工艺信息。

模型信息的获取是一个渐进过程,在装配工艺数据流的驱动下,不断向模型添加数据,以满足下一步工艺规划的需求,最终形成集产品结构、工艺过程、装配资源于一体的装配工艺模型,作为三维装配工艺设计的基础,如图 3 所示。

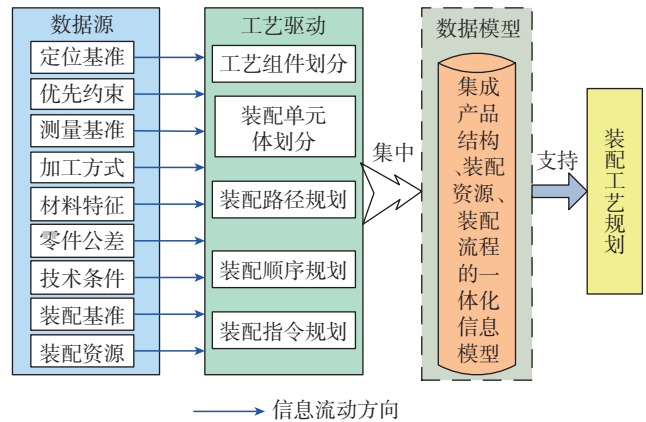


图3 装配工艺数据流驱动模型
Fig.3 Driving model for data flow of assembly process

2.1 产品结构数据

发动机结构数据是装配模型的主要组成内容,产品结构数据主要包括产品零、部件的几何数据和辅助数据,几何数据主要以三维标注的形式在模型实体中体现,辅助数据以参数形式按照与零部件的对应关系存储在产品结构树中。发动机产品结构包含大量的零部件数据信息,这些零部件之间的层次关系、装配关系等保证了发动机产品结构树的合理性,也是后续工艺设计及工艺分析的必要条件。

2.1.1 层次关系

发动机装配工艺设计是一个自顶向下的设计过程。为实现产品功能,完成发动机装配工作需要定义发动机产品结构层次:

- (1) 零件: 装配体中最基本的组成元素,它是不可拆分的几何实体,如单个锁片、螺钉等。
- (2) 组件: 在设计过程中确定的能完成某项功能的逻辑实体,它由若干个零件组合而成,如成套的卡箍。
- (3) 部件: 装配体中最基本的逻辑组成元素,它是零件和组件的并集,如带叶片的涡轮盘。
- (4) 装配单元体: 装配过程中的划分单元,它是产品功能的形成处,如低压涡轮单元体。

2.1.2 装配关系

装配关系是依据发动机产品装配特征及装配要求所建立和描述的,是发动机产品装配模型的核心要素。装配关系体现和维护了产品的功能,反映了产品不同层次零部件之间的相互约束关系,它由特定的装配特征决定,是完成装配要求的重要保证。装配关系可分为位置关系、连接关系、配合关系和运动关系,如图 4 所示。确定这些装配关系才能使发动机产品具有稳定的结构和功能。在建立产品的装配模型时,需要考虑以上 4 种产品间的装配约束关系。

2.1.3 辅助数据

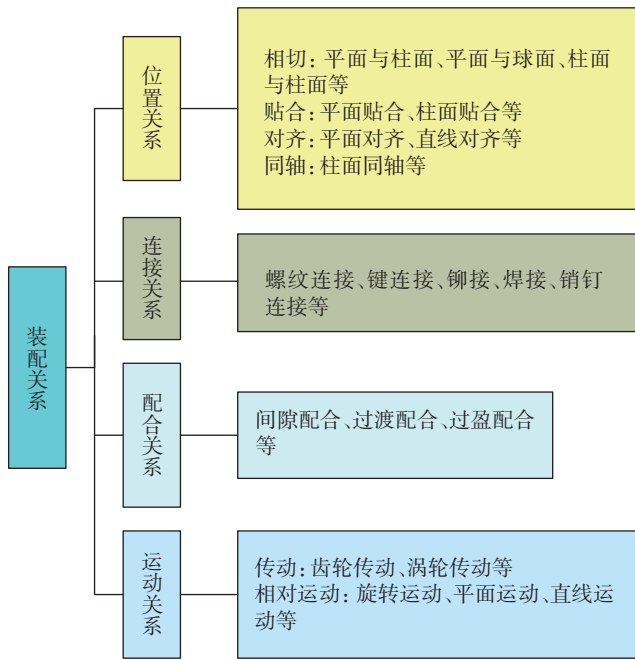


图4 产品零部件之间的装配关系

Fig.4 Assembly relation between parts and components in product

产品的三维模型是装配工艺模型的基础,装配工艺规划过程中需要大量的辅助数据以保证装配工艺规划顺利进行和装配工艺方案的准确性及可行性。辅助数据包括工艺基准数据、零件属性数据等。

2.2 工艺结构数据

工艺结构数据模型是指发动机装配过程中针对某个零部件采用相应的装配工装完成零部件的装配过程,装配操作定义了装配对象的装配路径及装配顺序,操作者进行装配工作的操作步骤,以及装配工装的使用方法、运动方式及其运动空间。工艺结构数据的引入,为产品及资源的运动仿真提供了数据依据,而多元化的装配过程仿真包含了零部件之间的碰撞检查,工艺方案的正确性分析,厂房布局的合理性规划,装配工装的适用性、操作舒适性验证等内容,保证了装配工艺方案的可行性与正确性,使其能够更好地指导现场装配。

2.3 资源结构数据

就大多数产品装配过程来说,装配工装是实现其装配操作的必要组成部分,可以说,是针对产品装配特点设计的大量装配工装驱动完成了不同装配单元及其零部件的大量特定的装配操作,实现了其装配目的。而对于发动机装配而言,由于其结构和工作环境不同于一般机械产品,所以在装配过程中除了采用各种通用的装配台、常用工具和试验设备外,还须针对不同机型的零件、组合件以及部件的专用装配工艺装备,如专用装配台、拔具、吊具以及一些专用的装配工具等。

2.4 装配工艺模型的组织 and 表示

一个数据完整的装配模型主要由 PPR 数据构成,将这些数据合理地组织起来,才能更好地支持装配工艺规划的全过程。

针对发动机产品的各个零部件,需要以其产品模型的层次结构为基础,结合它们之间的层次关系和装配约束关系,分析它们的装配过程及需要的装配资源,使它们形成一个数据完整而又结构合理的装配工艺模型,有效地支持装配工艺规划过程^[9]。一体化的装配工艺模型集成了产品结构、工艺过程、装配资源数据,其建立过程如图 5 所示。

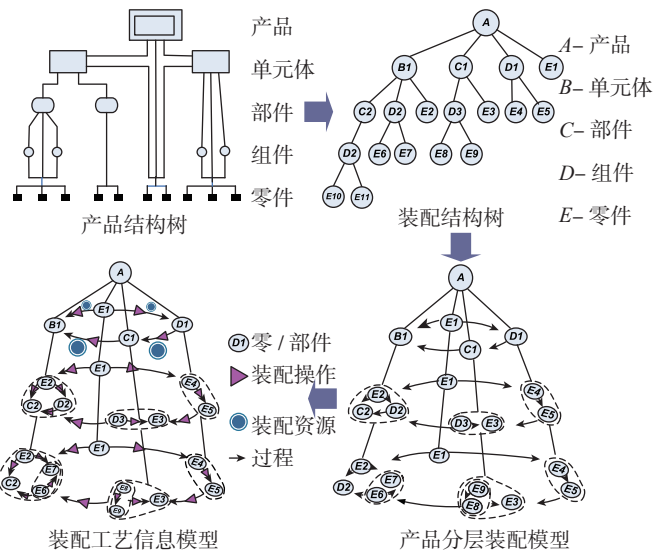


图5 装配工艺数据流控制的渐进式装配工艺模型及其建模过程

Fig.5 Progressive assembly process model and its modeling process controlled by data flows of assembly process

3 数字化装配工艺的应用

3.1 装配工艺规划

3.1.1 设计数据的接收

进行数字化装配工艺规划首先要完整且准确地接收 MBD 设计数据,它是保证整个产品设计及工艺规划过程中数据的唯一性和同步更新的重要保证。

在发动机的数字化研制过程中,首先需要从数据管理系统中接收设计模型,提取并创建所需的工艺信息,完成 EBOM 向 PBOM 的转换,建立装配工艺模型, PBOM 的编制主要完成工艺路线分工和添加工艺组合件两部分内容。包括制定发动机整机装配方案及总路线(含总路线验证及调整)、工艺初步布局、大型工装需求和将装配单元体装配方案任务下发至部件负责人。

3.1.2 三维 AO 编制

在初步定义装配工艺模型的基础上,确定该装配工艺过程零组件、消耗件、成品件等装配顺序,规划装配路径及装配顺序,确定重要的工艺步骤,进行 AO

(Assembly Order, 装配指令)下工步的详细设计,并在工步下关联产品的零组件、成品件和标准件。同时,选定该工步所需要的装配工装、辅助材料等一系列的装配资源与工步关联,结合产品的连接形式,确定装配方式,形成用于指导现场装配的 AO 信息。

通过装配仿真验证,在 DELMIA 的 DPE 模块中对产品、工装、AO 内容及装配顺序等进行优化;利用 Pert 图调整工艺路线,编辑生成工步内容;进入 3DVIA Composer 软件界面中编辑,并整合每一工步的视图、关联的部件及资源,在视图中添加标注信息、测量信息以及技术要求等。将每个工步所包含的实体模型通过轻量化模型表述,装配过程所需的装配信息(如喷管打压要求、定位基准信息等)通过不同三维装配视图表达,完成工步级装配可视化文件编制,如图 6 所示。经过详细装配工艺仿真验证,最终形成包含多种媒体、数据格式的三维 AO。

3.1.3 三维工艺规程生成

为实现发动机装配工艺业务数字化和生产现场的无纸化管理,生产现场不再以二维图纸为装配依据,而是用三维 AO、可视化装配仿真文件以及结构化的视图标注指导现场装配作业。针对发动机装配过程定制三维 AO 输出程序,将仿真过程、AO 内容等生成以结构化数据为基础的可视化三维规程,包括 AO 内容文件、零件明细表、消耗件配套表、标准件选用表等文档信息及装配仿真视频和三维工步视图。

3.2 装配工艺仿真

装配过程仿真是对装配工艺设计的迭代优化过程,它所生成的仿真视频能指导装配现场,使装配操作人员更清楚装配操作步骤,加深他们对整个操作过程的理解,起示范作用,从而提高工作效率及装配质量,减少误操作^[10]。

工艺仿真工作贯穿于整个发动机工艺设计过程,在发动机工艺设计的不同阶段,需要进行的工艺仿真也相应改变。在工艺论证及工艺方案规划阶段,需要针对发动机的制造单元体及其包含的零件、组件、部件的关键装配过程进行仿真,验证方案的合理性、产品的可装配性、可制造性,检查结构设计的合理性。在工艺规划阶段,进行装配流程设计,根据产品装配顺序、物流方向、工装占地面积和生产

辅助面积进行装配生产线的布局仿真,评价厂房布置合理性,优化装配生产线。在工艺详细阶段,通过数字化工艺模型对装配过程复杂的装配单元进行详细装配工艺过程仿真,验证详细装配工艺设计、工装设计、工具选择的适用性;对于操作空间小,可视性差、操作舒适性差的部位进行人机工程仿真;按照装配流程进行全面的工艺布局仿真及生产能力平衡验证,优化生产线布局和物流。在工装设计阶段,进行制造资源仿真,设计出合格的工装资源。为避免不必要的重复工作,保证及时发现问题,对装配仿真工作进行规定,具体仿真流程如图 7 所示。

在发动机的数字化工艺规划过程中,工艺仿真主要有装配工艺过程仿真、人机工程仿真、厂房布局仿真等

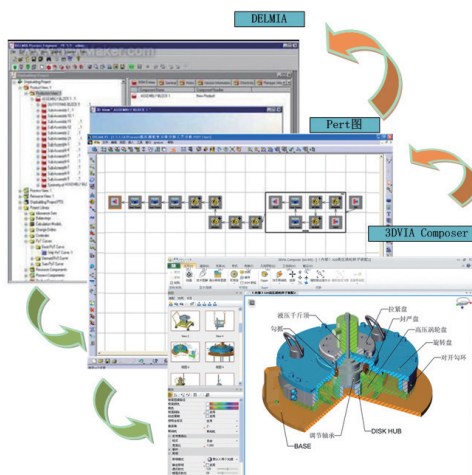


图6 工步级三维可视化文件编制

Fig.6 Process of drawing up three-dimensional visualization files for work step level

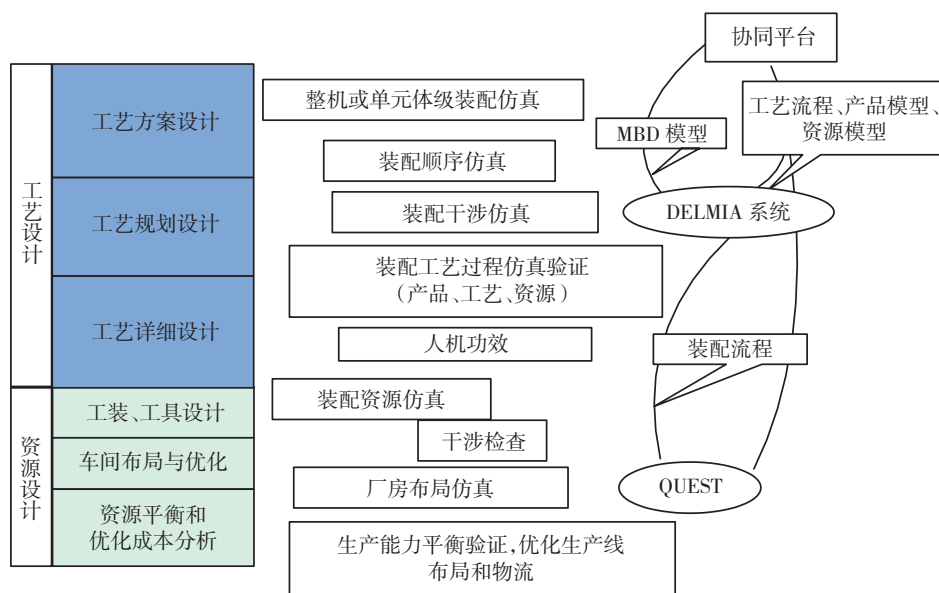


图7 装配工艺过程仿真流程

Fig.7 Process of assembly process simulation

几个方面,以完成对工艺规划的验证和优化。

3.2.1 装配工艺过程仿真

在发动机装配工艺设计过程中,需要以产品、工艺、资源数字化工艺模型(PPR)为基础,在数字化装配环境下,依据 AO 内容、初步设计及装配工艺方案对产品的装配过程和分解过程进行装配工艺过程仿真,验证每个装配单元体的装配顺序是否合理,每个零件的装配路线是否可达、装配方式是否可行、每套装配工装是否可用。在仿真过程中及时发现干涉问题、工装设计问题,分析干涉区域和干涉原因,工装不可用原因,修正工艺方案、详细工艺流程的错误及问题。

3.2.2 人机工程仿真

发动机装配过程中,很多工步装配空间小,开敞性、操作性差,有些区域装配可视性差,甚至需要盲装。针对这样的区域,需要利用特定的人体三维模型结合装配工艺模型进行人机工程仿真,以便验证这些工步的工艺设计合理性,装配操作可达性以及操作者工作的舒适性,发现其中问题,及时进行更改。

4 结束语

MBD 技术的应用使三维模型成为制造过程中的唯一依据,引发了整个制造模式的转变。本文以建立基于 MBD 数模的数字化装配工艺体系为目标,对上游 MBD 设计模型进行 BOM 重构,借鉴数据结构化的思想,构建了以 PPR 为核心结构的装配工艺模型,并以此为基础,以发动机装配为实例,提出了基于 MBD 的装配工艺规划流程,将三维 AO 编制、装配仿真技术引入装配工艺规划过程中,合理规划航空发动机装配顺序及装配路径,提高装配质量和效率。

目前,发动机装配工艺工作并未达到全三维水平,还需进一步深入开展研究工作,建立三维数字化设计制造一体化集成应用系统,健全发动机数字化工艺设计体系。发动机的数字化装配是缩短发动机研制周期、降低制造成本、提高产品质量的重要保障,也是发动机装配技术未来发展的必然趋势。

参考文献

- [1] 《透平机械现代制造技术丛书》编委会. 装配试车技术. 北京: 科学出版社, 2002.
- [2] 周建华, 范玉青. 产品三维数字化定义在波音飞机公司的应用. 航空工艺技术, 1996(2):7-10.
- [3] 杨五兵. MBD 制造技术在 B787 项目中的应用. 第五届中国航空学会青年科技论坛, 南昌, 2012.
- [4] 李婷婷, 刘俊堂, 张永辉. MBD 技术在大飞机研制中的应用. 航空制造技术, 2014(17):88-92.
- [5] Alemanni M, Destefanis F, Vezzetti E. Model-based definition design in the product lifecycle management scenario. International Journal

of Advanced Manufacturing Technology, 2011(1-4):1-14.

- [6] 刘超, 李原, 余剑锋, 等. MBD 中三维标注信息的本体构建方法研究. 锻压装备与制造技术, 2014(4):117-121.
- [7] 张魁, 范玉青, 卢鹤, 等. 基于 MBD 制造体系的装配工艺数据集成. 制造业数据化, 2009(1):55-58.
- [8] 贾晓亮, 丁晓宇, 耿俊浩. 面向 PLM 基于 3D 产品模型的航空产品数字化工艺技术研究. 航空精密制造技术, 2011(3):49-53.
- [9] 徐庆泽, 王征, 蔡晋. 面向航空产品的装配工艺规划技术研究. 航空科学技术, 2014(5):57-62.
- [10] 冯廷廷. 基于 MBD 的飞机装配工艺规划与仿真 [D]. 南京航空航天大学, 2011.

(责编 古京)

(上接第 45 页)

国在钛合金方面也采用了 3D 激光打印技术用于新机试制。

中国航空制造业的未来发展不仅需要依靠智能制造技术,而且还需要智能化管理模式,这也是追赶欧美发达强国制造业的基础条件。实现航空智能化制造的关键因素是建立数字化制造生产线,这其中包括柔性数字化工装设计、数字化制孔铆接技术、数字化飞机装配技术、数字化在线检测技术等。为加快国内航空制造业的发展,应用数字化、智能化技术势在必行,但应充分利用前期研究的工作成果,从根本上提高我国航空制造业的水平,并为新一代飞机制造奠定基础。

3 结束语

“德国工业 4.0”、美国工业制造复兴计划、《中国制造 2025》规划将会给未来世界经济发展带来巨大变化。“德国工业 4.0”、美国工业制造就是以智能制造为主导的新工业革命,此次工业革命表现为两个根本性的产业模式转变,一是终结大规模流水线的生产模式,从而转向定制化生产;二是将工业互联网应用到制造业,实现产业形态从生产型制造向服务型制造的转变。中国未来制造业的发展就是要实现智能化制造,并且实现智能化管理模式,具体目标:制造业增加值位居世界第一,主要行业产品质量水平达到或接近国际先进水平,形成一批具有自主知识产权的国际产品;部分战略产业掌握核心技术,接近国际先进水平。

参考文献

- [1] 工业 4.0 工作组. 德国工业 4.0 战略计划建议. 机械工程导报, 2013(8):7-9.
- [2] 森德勒, 邓敏. 工业 4.0—即将来袭的第四次工业革命. 北京: 机械工业出版社, 2014:18-36.
- [3] 王喜文. 工业 4.0—最后一次工业革命. 北京: 电子工业出版社, 2015:25-35.
- [4] (德)阿尔冯斯-波特霍夫, 刘欣. 工业 4.0. 北京: 机械工业出版社, 2015:72-110.

(责编 谷雨)