



中航工业首席专家
技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目
中航工业科技与信息化部组织编写

袁 立 编著

飞机数字化制造 技术及应用

DIGITAL MANUFACTURING
TECHNOLOGY AND APPLICATION
FOR AIRCRAFT

航空工业出版社

中航工业首席专家技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目

飞机数字化制造 技术及应用

袁 立 编著

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

飞机制造技术涉及学科广, 包含内容多。本书围绕飞机制造的重点专业技术领域, 详细介绍了数字化条件下飞机制造的工艺设计内容、仿真方法, 以及相关的工艺装备、关键技术及解决途径。全书共 8 章, 内容分别为并行产品数字化定义、结构件数控加工技术、钣金零件成形技术与管理、复合材料构件数字化制造与管理、数字化焊接技术、热处理工艺与管理、飞机金属零件增材制造技术、装配技术与管理。本书以数字化技术应用为重点, 利用典型案例分析、介绍数字化技术应用方法。

本书供从事飞机制造工艺技术工作的工程人员使用, 可作为飞机结构设计人员的参考资料, 也可作为航空航天院校师生的教学参考书。

图书在版编目 (C I P) 数据

飞机数字化制造技术及应用 / 袁立编著. —北京 :
航空工业出版社, 2018. 6

(中航工业首席专家技术丛书)

ISBN 978-7-5165-1582-2

I. ①飞… II. ①袁… III. ①数字技术—应用—飞机
—制造 IV. ①V262-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 109979 号

飞机数字化制造技术及应用 Feiji Shuzihua Zhizao Jishu ji Yingyong

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑 2 号院 100012)

发行部电话: 010-84936597 010-84936343

北京隆元普瑞彩色印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2018 年 6 月第 1 版

2018 年 6 月第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/16

印张: 19.5

字数: 496 千字

印数: 1—2000

定价: 155.00 元

总 序

航空工业被誉为“现代工业之花”，是国家战略性高技术产业，同时也是技术密集、知识密集、人才密集的行业。中国是世界航空产业格局中的后来者，而中航工业作为支撑中国航空工业发展的核心力量，履行国家使命，必须大力推进自主创新，必须在科技创新和知识创新上有所作为。

从 2009 年开始，中航工业按照航空技术体系，在科研一线技术人员中陆续遴选出近百位集团公司级“首席技术专家”。此举既是集团公司对这些技术人员技术水平和能力的肯定，也意味着集团公司赋予了他们更大的责任和使命。我们希望这些技术专家在今后的工作中，要继续发挥科研技术带头人的作用，更加注重学习和创新，不断攀登航空科技新的高峰；要坚持潜心科研，踏实工作，不断推动航空科技进步；要带队伍、育人才，打造高水平的科研队伍，努力培养更多的高层次专业技术人才，为中航工业的发展做出更大的贡献。

21 世纪企业的成功，越来越依赖于企业所拥有知识的质量，利用企业所拥有的知识为企业创造竞争优势和持续竞争优势，这对企业来说始终是一个挑战。正因如此，“知识管理”在航空工业等高科技产业领域得以快速推广和应用。依照这个思路，将首席技术专家们所积淀和升华出来的显性或隐性知识纳入知识管理体系，是进一步发挥其人才效益的重要方式，也是快速提升中航工业自主创新能力的的重要途径。

知识管理理论的核心要义，就是把知识作为一种重要资产来进行管理，正如知识管理的创始人斯威比所说：“知识资本是企业的一种以相对无限的知识为基础的无形资产，是企业核心竞争能力的源泉。”如果专家们把其掌握的各类显性或隐性知识，用书面文字的形式呈现出来，就相当于构建了一个公共资料库，提供了一个交流平台，可以让更多的人从中受益——这就是出版这套“中航工业首席专家技术丛书”的初衷。

集团公司的这近百位“首席技术专家”，基本覆盖了航空工业的所有专业。每位专家撰写一部专著，集合起来，就相当于一个航空工业的“四库全书”，很有意义。在此，我要特别感谢这些专家们，他们在繁重的科研生产任务中，不辞辛劳地撰写出了自己的专著，无私地将自己的宝贵经验呈现给大家，担当起了传承技术、传承历史的责任。

相信这套丛书的出版，会使更多的航空科技工作者从中获益，也希望在一定程度上能助力中航工业的自主创新，对我国航空工业的科技进步产生积极影响。



中国航空工业集团公司董事长

前 言

要实现中华民族伟大复兴的目标，就必须坚定不移地贯彻科教兴国和创新驱动发展战略。国务院在 2015 年发布的《中国制造 2025》战略规划中明确提出了中国制造强国建设三个 10 年的三步走战略，要求在促进工业化和信息化深度融合，开发利用网络化、数字化、智能化技术等方面，着力在一些关键领域抢占先机，取得突破。

近十几年，中国的航空工业走完了世界航空史上几十年走过的路，从 20 世纪 90 年代的望尘莫及，到望其项背，再到如今的同台竞技，我们正在向着领先超越的方向发展。在这个过程中，飞机的设计、试验技术、机载航电、武器控制技术的发展尤为突出，飞机零件制造及装配技术水平虽然也取得了长足的进步，但是，总体上与国外先进飞机制造水平相比还有代差，如何进一步缩小差距，尽快赶上并超越世界先进水平，是我们这一代人的历史使命。

近年来，国内各大院校和航空企业纷纷投入力量研究飞机数字化制造技术，特别针对基于模型的设计制造、结构件高效数控加工、整体化加工、增材制造、装配等方面的技术开展了大量的技术攻关，取得了一些技术成果。这些数字化制造技术的科研成果正在逐步应用于飞机的研制与生产中，在数字化设计领域各主机厂所已基于协同设计平台开展规范化的并行产品数字化定义；在零件制造领域，大型复杂复合材料制件、大型钛合金电子束焊和超塑成形激光焊整体结构件等已装机应用；在装配领域突破了数字化装备制造与应用的关键技术，开始进行部件自动对接和自动制孔等装配技术应用。

应用飞机数字化制造技术改变飞机制造生产方式是一项复杂的系统工程，涉及多学科、多领域知识的综合应用，需要有一个新的技术体系来支撑。当前数字化制造技术正处于快速发展时期，为了使从事与飞机制造相关工作的广大科技人员能够比较全面地了解和掌握飞机数字化制造技术及其应用理念，将数字化制造方面的研究成果与大家共同分享，推动飞机数字化制造技术快速发展，作者对多年来从事的数字化制造技术研究成果进行系统总结与精练，编著此书。

本书以面向工程应用为宗旨，详细阐述了数字化条件下制造技术发展特点，系统地介绍了并行产品数字化定义的业务流程和数据组织与管理的方法，针对飞机制造的主要专业领域，详细介绍了结构件数控加工，钣金零件成形与管理，复合材料制件制造与管理，数字化焊接，热表处理工艺与管理，增材制造，装配技术与管理等方面的新工艺、新技术，以及管理控制要素和信息化管理手段，并结合实际分析介绍了应用案例。

本书供从事飞机制造工艺技术工作的工程人员使用，可作为飞机结构设计人员的参考资料，也可作为航空航天院校师生的教学参考书。

本书是编者多年来从事新型飞机研制和多个国家科技项目研究成果的结晶，在编著过程中得到了生产一线技术人员和各院校课题组成员的大力支持与帮助，在此特别感谢郭洪杰、冯子明、张鑫、初宏震、张冕、焦清阳、赵璐、苏杭、赵建国、王巍、王共冬、赵昌葆、马琳等人为著述提供了大量的资料。

目 录

引言	(1)
第 1 章 并行产品数字化定义	(5)
1.1 并行定义的组织与管理	(5)
1.1.1 并行定义团队及工作内容	(5)
1.1.2 并行定义数据成熟度控制	(7)
1.2 数字化制造工艺性要求	(10)
1.2.1 通用要求	(10)
1.2.2 机加实体工艺性要求	(11)
1.2.3 钣金实体工艺性要求	(12)
1.2.4 导管零件实体工艺性要求	(13)
1.2.5 复材零件实体工艺性要求	(14)
1.3 产品数据管理	(16)
1.3.1 产品多视图管理	(16)
1.3.2 构型管理	(19)
1.3.3 文档管理	(19)
1.3.4 workflow 管理	(21)
1.4 协同平台作用于功能	(23)
1.4.1 数据协同管理	(24)
1.4.2 正式发放数据管理	(25)
1.4.3 沟通与协作	(25)
1.4.4 workflow 协同	(25)
第 2 章 结构件数控加工技术	(27)
2.1 数控加工概述	(27)
2.1.1 数控加工和数控机床	(27)
2.1.2 数控加工的特点和应用	(32)
2.1.3 数控加工的工艺性	(33)
2.2 数控加工工艺	(34)
2.2.1 航空结构件分类	(34)
2.2.2 航空结构件典型工艺	(37)
2.3 数控编程技术	(42)
2.3.1 数控编程的方法	(42)

2.3.2 数控编程的流程和要求	(44)
2.3.3 快速数控编程技术	(48)
2.4 数控加工仿真	(55)
2.4.1 数控加工仿真方法	(55)
2.4.2 数控加工仿真应用	(57)
2.5 结构件数字化检测	(58)
2.5.1 数字化检测概述	(58)
2.5.2 结构件测量方法	(60)
2.5.3 测量数据采集与分析	(61)
第 3 章 钣金零件成形技术与管理	(64)
3.1 钣金零件数字化工艺设计	(64)
3.1.1 数字化定义钣金零件工艺特点	(64)
3.1.2 数字化钣金零件工艺特征的识别	(65)
3.1.3 数字化钣金零件工艺审查	(69)
3.1.4 钣金展开料的数字化设计	(72)
3.1.5 数字化工艺信息模型表达	(74)
3.2 钣金成形仿真技术	(75)
3.2.1 飞机钣金成形仿真技术概述	(75)
3.2.2 仿真材料模型选取及材料模型参数	(77)
3.2.3 航空钣金成形仿真系统的应用	(82)
3.3 航空钣金数控设备	(97)
3.3.1 航空钣金数控设备概述	(97)
3.3.2 航空钣金数控设备类型	(98)
3.4 钣金零件数字化检测	(103)
3.4.1 钣金零件数字化检测概述	(103)
3.4.2 数字化检测方法的特点	(104)
3.4.3 钣金零件数字化检测要求	(105)
3.4.4 钣金零件数字化检测流程	(105)
3.4.5 钣金零件成形精度评判	(106)
第 4 章 复合材料构件数字化制造与管理	(109)
4.1 复合材料构件数字化制造的总体框架	(109)
4.2 复合材料构件数字化工艺设计	(110)
4.2.1 基于模型的工艺设计	(112)
4.2.2 工艺环境设计	(115)
4.2.3 数字化制造流程	(116)
4.2.4 数字化制造数据定义与应用	(117)
4.3 工艺仿真分析	(119)

4.3.1 液态成形树脂注射模拟仿真	(120)
4.3.2 固化工序设计仿真	(127)
4.3.3 热压罐工艺仿真	(129)
4.4 复合材料构件数字化制造设备	(131)
4.4.1 自动下料机	(131)
4.4.2 激光投影仪	(134)
4.4.3 热隔膜成形机	(135)
4.4.4 热压罐	(136)
4.4.5 自动铺带机	(136)
4.4.6 自动铺丝机	(138)
4.4.7 五坐标高速铣和柔性夹具系统	(140)
4.4.8 水切割	(142)
4.4.9 超声 C 扫描无损检测设备	(142)
4.5 生产准备和生产过程管理	(144)
4.5.1 数字化制造文件数据的准备	(144)
4.5.2 库房管理	(144)
4.5.3 生产过程信息管理	(145)
4.5.4 其他生产信息的管理	(149)
第 5 章 数字化焊接技术	(150)
5.1 焊接数据库系统	(151)
5.1.1 数据模型	(151)
5.1.2 数据库特点	(152)
5.1.3 焊接数据库系统实例	(152)
5.2 焊接专家系统	(156)
5.2.1 专家系统的构成及工作原理	(157)
5.2.2 焊接专家系统的应用	(159)
5.3 焊接力学性能预测	(164)
5.3.1 人工神经网络基本概念	(165)
5.3.2 人工神经网络特点	(165)
5.3.3 人工神经网络分类	(165)
5.3.4 人工神经网络工作原理	(167)
5.3.5 人工神经网络在力学性能预测中的应用	(167)
5.4 焊接模拟仿真计算	(168)
5.4.1 焊接热过程的特点	(168)
5.4.2 常用的模拟软件	(169)
5.4.3 常用的热源模型	(170)
5.4.4 焊接过程模拟举例	(173)
5.5 数字化焊接设备	(175)

5.5.1 数字化焊接设备的特点..... (175)

5.5.2 现有数字化焊接设备 (175)

5.5.3 未来数字化焊接设备的发展方向 (177)

第 6 章 热表处理工艺与管理..... (178)

6.1 热表处理工艺设计 (178)

6.1.1 二维热表处理计算机辅助工艺设计 (178)

6.1.2 三维热表处理计算机辅助工艺设计 (179)

6.1.3 三维表面处理计算机辅助工艺规程编制实例 (185)

6.1.4 三维热处理计算机辅助工艺编制实例 (191)

6.2 热表处理工艺代码编制 (192)

6.2.1 热表处理工艺代码的构成及其在三维数模中的运用 (193)

6.2.2 热表处理工艺代码在工艺编制中的运用..... (196)

6.2.3 热表处理工艺代码在生产管理中的运用..... (199)

6.2.4 热表处理工艺代码在并行制造中的典型应用 (200)

6.3 热处理模拟仿真技术及应用 (201)

6.3.1 热处理模拟仿真技术 (201)

6.3.2 热处理模拟仿真技术的应用 (202)

6.4 热表处理生产管理与应用 (208)

6.4.1 热表 MES 系统生产管理模式 (208)

6.4.2 热表 MES 系统生产管理模式技术的应用 (209)

6.5 数字化热表处理设备 (211)

6.6.1 进气道自动喷涂装备 (211)

6.6.2 尾翼自动喷涂装备 (213)

第 7 章 飞机金属零件增材制造技术..... (218)

7.1 概述 (218)

7.1.1 技术内涵 (219)

7.1.2 制造原理及分类 (219)

7.1.3 技术特点 (220)

7.1.4 技术发展现状 (221)

7.2 增材制造工艺设计 (222)

7.2.1 增材制造方法选择 (222)

7.2.2 工艺模型建立 (225)

7.2.3 成形工艺参数选择 (226)

7.2.4 工艺代码后置处理 (227)

7.2.5 零件成形制造过程 (228)

7.2.6 零件后处理工艺 (232)

7.2.7 零件检验 (236)

7.3 典型方法和设备	(240)
7.3.1 选择性激光熔化	(240)
7.3.2 激光熔融沉积	(241)
7.3.3 电子束选区熔化	(242)
7.3.4 电子束熔丝沉积	(243)
7.3.5 典型工艺方法比较	(245)
7.4 未来发展	(245)
第 8 章 装配技术与管理	(247)
8.1 数字化三维装配工艺设计	(247)
8.1.1 数字化装配工艺设计主要内容	(247)
8.1.2 数字化三维工艺系统架构	(254)
8.1.3 三维装配工艺设计典型应用	(255)
8.2 柔性装配工艺与装备	(257)
8.2.1 数字化柔性装配工艺方法	(257)
8.2.2 数字化柔性装配工艺装备	(258)
8.2.3 柔性装配工艺装备典型结构形式与分类	(259)
8.3 数字化装配仿真	(265)
8.3.1 装配仿真与数字化预装配	(265)
8.3.2 装配工艺方案仿真	(266)
8.3.3 装配过程仿真	(267)
8.4 数字化设备	(271)
8.4.1 制孔设备	(271)
8.4.2 铆接设备	(273)
8.4.3 飞机装配辅助装置	(277)
8.5 数字化检测	(279)
8.5.1 检测基准选择	(279)
8.5.2 数字化检测规划	(279)
8.5.3 测量误差分析与修正	(282)
8.5.4 测量设备	(283)
8.5.5 测量软件	(285)
8.6 数字化装配生产线	(286)
8.6.1 数字化装配生产线特点	(286)
8.6.2 数字化装配生产线规划	(287)
8.6.3 机身装配生产线产能分析	(292)
参考文献	(297)

引 言

世界航空工业发展百年以来，随着复杂航空武器装备的快速升级换代，各项制造技术取得了突飞猛进的发展，飞机制造领域不断取得突破和创新。飞机的发展拉动了飞机制造技术的发展，而制造技术的创新发展又推动了飞机向更高的水平不断换代演进。不同时代的飞机具有不同的技术特点，所采用的材料和制造技术也大不相同。

自第一次世界大战中，军用飞机首次出现在战场上，战斗机（歼击机）经历了近百年的发展，国际航空界依据战斗机的作战任务和技术特点，对其进行了分“代”。每代飞机应用的典型材料与典型工艺技术特点如表 0-1 所示。

表 0-1 各代战斗机技术特点

代次	典型飞机	典型材料	典型工艺
第一代	F-100、米格 -19	铝合金，以 LY12 铝合金为代表	钣金成形，铆接和焊接
第二代	F-4、F-104、米格 -23、“幻影” III	铝合金为主，开始应用复合材料（复材）、钛合金	小型复合材料，夹层结构和整体壁板结构制造工艺技术
第三代	F-16、F/A-18、米格 -29、苏 -27、“幻影” 2000	在铝合金的基础上，钛合金和碳纤维复合材料得到广泛应用	整体结构精确成形加工工艺和高抗疲劳连接技术
第四代	F-22、F-35、苏 -47、T-50、歼 20 （美、俄称第五代）	复合材料和钛合金用量大幅增加，分别达到 35% 和 37%	大型复合材料整体结构制造技术、金属整体结构件制造技术、自动化装配技术和数字化技术

由表 0-1 可知，伴随着飞机性能的稳步提升，飞机制造模式也发生深刻的变革与创新。如图 0-1 所示，在新型飞机上，复合材料、钛合金用量日趋上升，已成为主体材料，新材料的广泛应用给飞机制造业带来更高的技术要求与挑战。同时，随着数字化技术研究应用的逐步深入，飞机制造正逐渐摆脱以实物模拟量传递且相互联系的串行制造方式，取而代之的是以三维（3D）数字量传递的并行独立制造方式。新材料与新制造方式的普及带动了飞机制造企业在生产技术领域实现突破。在零件制造领域，全新的零件制造技术逐渐呈现出高精度、大尺寸加工、高材料利用率、近净成形、高效率、柔性工装、无膜制造、数控加工等特点。在飞机装配领域，传统的模拟量协调、手工钻铆、专用刚性工装、专用量具检测等技术逐渐被数字量协调、自动化钻铆、柔性工装、数字化检测、高效快速研制等技术取代。

新一代飞机轻量化、隐身、高可靠性、长寿命、短周期、低成本等研制需求，对飞机制造技术提出了更高的要求：零件制造向无膜敏捷制造、大型整体复合成形、精准制造方向发展，装配向数字化、柔性化发展。综合分析国内外飞机制造技术发展，总结起来有以下特点。

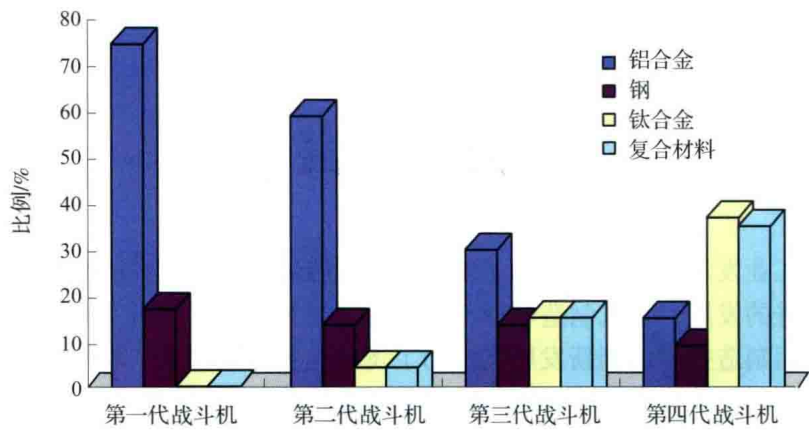


图 0-1 各代战斗机主要材料使用比例

（1）一体化设计制造技术

目前，国外飞机生产企业已经成功应用基于模型定义（MBD）技术，这使得设计制造一体化技术得到大发展。MBD 技术已经使现代飞机设计理念完全不同于以往，变为面向制造的设计、各专业协同的设计和基于知识的设计。面向制造的设计是指在时间维度上，更注重设计与制造并行，即在设计过程中就有制造和检验人员的全程参与，以便及时对零件和产品在制造过程中可能出现的问题向设计部门及时反馈，以免在设计定型后因为无法制造或者制造难度过高造成设计的更改而延误生产进度。各专业协同设计是指在空间维度上，工装、工艺、航电、机体结构、总体气动等诸多方面的人员协同工作，以便及时反馈各种可能出现的问题。基于知识的设计是指在设计过程中要遵从和参考以往的标准和规范，但是同时，新的知识库也要对以往的标准、规范进行完善和补充。

一体化的设计制造技术还体现在设计、制造和检验过程的全三维模型传递。以往飞机制造过程一般是三维设计后，变为二维图样制造和检验，数据以模拟量和数字量的混合传递为主，容易造成数据丢失。而一体化设计制造技术要求在整个设计、制造和检验过程中实现全三维数字量传递，所有数据实时共享，这必将极大地提高制造和检验的效率，同时减少由于数据不协调带来的制造误差。

（2）数字化精准制造技术

数字化精准制造技术是现代工业制造发展的大趋势，对于飞机制造而言，更是贯穿在几乎所有飞机零件的制造过程中。

机械加工（机加）零件往往作为飞机的骨架，其精度要求一般在微米量级，因此要求加工的精度非常高，而且数控加工零件的去除量都在 50% 以上，部分零件甚至达到 90%；薄壁、深槽腔特征占 80%，为典型的弱刚性结构，加工状态极不稳定，因此对加工效率、加工精度、加工表面粗糙度、刀具耐用度、颤振抑制和变形控制等都提出了更高的要求。

钣金零件在加工过程中往往出现起皱、回弹等现象，应用钣金仿真软件进行复杂零件成形分析，可以提高钣金制造能力，有效地消除起皱、回弹等问题；应用展开数模进行数控下料，可以取消成形后的修边工作，提高生产效率；建立基于柔性多点工装的数字化蒙皮成形生产线是蒙皮类钣金零件精准成形的发展趋势。

在焊接件领域，以高能量密度、高焊接精度和高焊接效率为特点的激光焊技术，已经

成为替代铆接的先进技术。空客 A380 将焊接技术应用于飞机机身、机翼的内隔板与加强筋的连接,显著减轻 18% 的飞机重量^①。另外, F-14、F-22 等战斗机机身的部分承力结构、大飞机发动机中的钛合金低压风扇转子、钛合金高压压气机转子、高温合金高压压气机转子、高温合金燃烧室组件,以及燃烧室外套等核心级零部件均采用能量密度极高的电子束焊接技术,实现了深宽比大的金属材料的深熔透焊接,焊接残余变形小,焊接质量较高。

除此之外,复合材料零件精准成形、激光/电子束快速成形、系统附件精密制造,以及锻铸件近净成形技术等也是飞机零件精准制造的必然趋势,它们的共同特点是都朝着数字化、自动化和专业化方向发展。

(3) 结构件整体加工技术

结构件整体加工技术是指将原来多个零件的组合体变为一个大型零件的加工技术。这可以有效减少连接件的数量,降低飞机重量,提升飞机的机动性、续航能力和战斗能力。

以钛合金超塑性成形为例,与传统铆接结构和螺接结构相比,钛合金超塑性成形/扩散连接(SPF/DB)的整体结构具有成形性好、设计自由度大、成形精确、无残余应力、零件和工装数量少、可消除紧固孔引起的裂纹源等优点,从而使其结构耐久性和损伤容限性有了大幅度的提高和改善,使其成为航空航天领域的一项关键制造技术。美国最早将 SPF/DB 技术用于飞机制造, F-22 战斗机的后机身隔热板采用 SPF/DB 结构件后,减重 10% ~ 30%,成本降低 25% ~ 40%。

(4) 柔性化快速装配技术

这里所说的柔性化快速装配技术,主要针对飞机装配过程。传统的飞机装配过程通常有大量的固定结构的工装,同时配合人工手动钻铆完成。该方法已经无法满足新一代飞机的性能要求,必须建立数字化的柔性装配生产线。

一条完整的柔性装配生产线包括自动制孔铆接单元、柔性工装单元、数字化检测单元、自动化辅助运输单元与信息化集成管理单元 5 个部分。

现代飞机对机体结构的寿命、质量、密封、防腐等方面的要求越来越高,对制孔及连接要求更精、更严;此外,现代飞机结构中复合材料、钛合金等各种新型材料的应用比重大幅提升,也增加了装配中制孔及连接的难度。为了提高飞机装配中的制孔和连接质量,满足现代飞机的高性能要求,现代飞机制造中发展和应用了各种自动化的数控制孔及钻铆设备。典型的自动制孔铆接设备应该具有自动钻孔、自动选钉、送钉、自动铆接、铣削、涂胶等功能。目前常见的自动制孔铆接设备有爬行机器人自动制孔设备、数控托架-D 型自动钻铆设备和机器人-C 型自动钻铆设备等。自动钻铆设备还应与柔性工装相结合,形成各种形式的自动化制孔单元和装配单元,从而实现了制孔和铆接的柔性化、自动化、精确化,最终提高了飞机产品的装配质量和效率。

柔性装配工装是一种可重组的模块化、数字化、自动化的装配工装,通过其重构可以用于不同的飞机结构件装配,具有“一架多用”的功能,使得工装的数量大幅度减少,从而降低工装的制造成本,缩短工装准备周期,且减少了生产用地,可大幅度提高装配生产率。此外,柔性工装结构开敞性好,更利于在飞机装配中应用各种自动化的数控设备。在

^① 本书重量为质量(mass)概念,单位为 kg。

现代飞机装配中，形成了一系列基于柔性工装的数字化装配技术。

在飞机装配过程中，数字化检测手段也是必不可少的，激光跟踪仪是目前最常见的飞机装配过程中的检测工具。近两年，室内空间定位系统（iGPS）以其效率高、精度高、测量范围广、使用便捷等优势逐渐被应用于国内飞机装配。另外，装配过程中自动化辅助运输手段，如气垫运输技术等，与 iGPS 技术、数控技术相结合，实现了飞机部件在对接过程中的平稳运输，大大提高了飞机装配的工作效率和质量。信息化集成管理平台调度整个装配生产线的进度和物料供给调配等工作，是数字化装配生产线的中枢指挥系统。

（5）数字化精准定位、测量技术

随着对新一代飞机性能要求的提高，以及产品设计与制造技术的发展，具有复杂结构与型面特征的零部件在新机型号中大量采用，精度要求日益提升，检测难度日趋加大，传统检测过程中的非数字化测量技术已难以满足飞机零部件快速、高效、高精度检测要求。

目前，工业发达国家在飞机研制过程中已经大量地将三维数字化检测技术应用于复杂、关键件的质量检测与控制。以照相测量、激光跟踪仪、激光扫描仪等为代表的数字化测量设备配合机器臂、自动转台等辅助设备已经取代传统测量技术，在飞机机身复杂零部件以及大尺寸零部件检测中得到越来越普遍的应用，计算机软件技术的飞速发展使得检测数据处理，以及与三维模型的快速比对成为可能。因此，数字化检测技术已经成为飞机数字化制造中的关键支撑技术之一，在提高飞机制造和装配质量及效率方面发挥着重要作用。

现代飞机制造技术始终沿着提高工艺技术与装备的加工效率、提高加工品质、适应产品品种变化、降低生产成本、完善自动化的方向不断发展。在发展中加强信息技术的应用，逐步实现集成化、敏捷化、智能化及航空产品全球化制造。在现阶段，我国航空制造业应该抓住机遇，在努力学习国外先进技术的同时，也要挖掘自身潜力，不断创新，不断发展，使我国的飞机制造水平不断取得新的跨越，为我国新型飞机的自主研制提供强有力的保障。

第1章 并行产品数字化定义

在传统的飞机生产方式中，工艺人员在获得图样后首先制定装配协调方案，然后方能按照协调路线规定的次序依次开展工作，所以只能环环相扣地串行作业，并行作业受到很大限制。

在数字化的生产方式下，工程技术人员基于网络化的协同工作环境，在同一数据源下，根据设计结果成熟度的变化，不断追踪产品的设计状态，协同开展产品、工艺、工装的设计工作，以尽早发现并解决设计、工艺、工装之间的不协调问题，最大限度地保证并行产品数字化定义工作的质量和效率。

产品数字化定义是根据设计依据和用户需求，在统一的协同设计环境中按照一定的规范和协议进行产品数字化设计，此项设计技术的基本工作是建立产品的数字化模型，完成数字样机的设计。所有零部件的三维设计结果包含三维模型、设计文档、物料清单（Bill of Material, BOM）等所有相关产品定义的全部信息，是唯一的权威性数据集，供所有的后续环节使用。

1.1 并行定义的组织与管理

集成产品开发团队已成为贯彻并行工程理念的一种标准组织模式，但是对于航空等大型复杂产品的开发，需要建立集成产品开发团队群，因此面临团队内部的组织、团队之间的协调、多个团队的管理、团队群与已有组织框架结构之间的关系等一系列理论和实践问题。

1.1.1 并行定义团队及工作内容

并行定义可以在设计的过程中，通过不同人员的广泛参与，用仿真手段不断优化设计，达到缩短研制周期的目标。如果仅仅将大量来自不同部门的人员简单组织在一起，仍然按部门管理的方式开展工作，是无法实现这个目标的。必须打破按职能划分的组织结构，采用矩阵型项目管理的组织结构，组成项目团队。团队成员必须有能力处理本专业的问题，完成本专业的设计任务，职能部门要支持派出的团队成员工作。

由于航空产品的复杂性，整个飞机的设计开发任务不可能由一个 IPT（Integrated Product Team，集成产品团队）完成。例如，波音公司在开发波音 777 的时候，就成立了 238 个 IPT，承担整个飞机的开发任务。这样，IPT 自身的组织结构往往包括两种——分层组织结构、扁平网络结构。

（1）分层组织结构 IPT 群最直观的组织方式是按照飞机的产品分解结构，将多个 IPT 组成一个多层次的阶梯型组织结构。在团队内部组织上，该框架是一个分形组织结构。在该类型的 IPT 群结构中，不论位于整个群体的哪一个层次和位置，每个 IPT 内部的组织方式完全相同。在大型复杂产品开发中，每层的 IPT 提供上一层的组件。在大多数这样的多