



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

冯子明 编著

飞机数字化装配技术

DIGITAL ASSEMBLY TECHNOLOGIES
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

飞机数字化装配技术

冯子明 编著

航空工业出版社

北京

内 容 简 介

本书围绕飞机装配技术,详细介绍了数字化条件下飞机装配的过程与特点,内容覆盖了装配工艺设计、数字化装配工艺装备以及生产线规划与管理等方面。全书共包括8章,各章内容分别为飞机装配技术概述,并行产品数字化定义与数据管理,装配工艺设计,飞机装配工艺技术,数字化柔性装配工装,飞机装配数字化测量,飞机装配生产线规划,以及数字化装配生产线管理。本书在对装配技术原理进行介绍的同时,侧重于对技术应用进行分析,并重点介绍了国内外先进飞机制造企业中的典型装配技术应用案例,对我国飞机制造企业的装配生产具有指导意义。

本书供从事飞机装配工艺工作的工艺技术人员使用,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(CIP)数据

飞机数字化装配技术 / 冯子明编著. --北京 : 航空工业出版社, 2015. 10

(中航工业首席专家技术丛书)

ISBN 978-7-5165-0904-3

I. ①飞… II. ①冯… III. ①飞机—装配(机械)—数字化 IV. ①V262.4-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第241238号

飞机数字化装配技术

Feiji Shuzihua Zhuangpei Jishu

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑2号院 100029)

发行部电话: 010-84936597 010-84936343

北京世汉凌云印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2015年10月第1版

2015年10月第1次印刷

开本: 787×1092 1/16

印张: 18.75

字数: 468千字

印数: 1—2000

定价: 114.00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

国务院日前印发《中国制造 2025》，部署全面推进实施制造强国战略。这是我国实施制造强国战略的第一个十年行动纲领。

制造业是国民经济的主体，是科技创新的主战场，是立国之本、兴国之器、强国之基。围绕实现制造强国的战略目标，《中国制造 2025》明确了其战略任务和重点，包括提高国家制造业创新能力；推进信息化与工业化深度融合；强化工业基础能力；大力推动重点领域突破发展，聚焦新一代信息技术产业、高档数控机床和机器人、航空航天装备等。

作为重点推进的领域之一，飞机数字化设计制造技术也在不断发展与成熟。20 世纪 90 年代初开始，国外先进飞机制造企业不断深化数字化技术的应用水平，使得飞机装配领域发生着制造模式的变革。他们的实践表明，这种制造模式的变革不是简单地将某些数字化技术应用到现有的工作环节中，而是一次从装配工艺方法、生产组织方式到制造流程的技术革命，必须系统性地设计与规划。这种变革的结果使工程设计水平和飞机研制效率得到了极大提高，制造成本显著下降，飞机交付速率不断提高。

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，特别是针对装配技术这一飞机制造的薄弱环节开展了大量的技术攻关，取得了一些技术成果。当前各飞机制造企业正结合技术改造将数字化制造技术的科研成果用于飞机的研制与生产中，已按型号或地区建立了协同设计平台，进行规范化的并行产品数字化定义。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。

应用飞机数字化装配技术彻底改变飞机装配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应用。目前国内关于飞机数字化装配方面的书籍和文献资料较少，为了使从事与飞机装配相关工作的广大科技人员能够比较全面地了解 and 掌握飞机数字化装配技术及其应用理念，将数字化装配方面的研究成果与大家共同分享，推动飞机装配技术快速发展，作者对多年来积累的数字化装配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的飞机装配技术体系，针对工艺设计，系统介绍了并行产品数字化定义、装配方案设计、装配仿真和详细工艺设计的方式、方法及数据管理和计算机软件功能要求等。针对数字化装配工艺方法，结合实际应用案例分析介绍了装配方法、工装形式、测量分析方法及自动化装备。针对生产线规划和管理，介绍了现代化装配生产线的规划思路、方法、管理控制要素和信息化管理手段。

本书供从事飞机装配工艺工作的工艺技术人员使用，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。

本书内容是多年来从事新型飞机研制和《飞机制造业数字化工程》、《飞机部件装配系统技术》等多个国家科技项目研究所得成果的结晶，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，同时特别感谢郭洪杰、欧阳、孙金平、王胜任、王学飞、潘新、罗祥笔、李东升、孟飙、曲学军、张丽艳、刘胜兰、邹方、周万勇、郝继贵、余剑峰、辛博等人此书提供了大量的资料。

冯子明

2015年5月

目 录

第 1 章 飞机装配技术概述	(1)
1.1 飞机装配特点与发展趋势	(1)
1.1.1 飞机装配特点	(1)
1.1.2 飞机装配发展趋势	(3)
1.2 传统飞机装配模式	(8)
1.2.1 模线样板	(9)
1.2.2 标准工艺装备	(10)
1.2.3 尺寸协调方法	(11)
1.2.4 装配定位方法	(12)
1.2.5 装配工装	(12)
1.2.6 装配连接技术	(15)
1.3 飞机数字化装配模式	(15)
1.3.1 面向装配的并行定义	(16)
1.3.2 基于模型的工艺设计	(16)
1.3.3 数字量协调方法	(17)
1.3.4 装配工装简单化、数字化	(17)
1.3.5 装配过程检测数字化	(17)
1.3.6 自动钻铆与自动制孔	(19)
1.3.7 管理信息化	(19)
1.3.8 数字化移动生产线	(19)
1.4 飞机数字化装配技术体系	(20)
1.4.1 数据平台层	(21)
1.4.2 专业技术层	(22)
1.4.3 应用系统层	(26)
1.4.4 通用技术层	(29)
1.4.5 装配过程层	(29)
第 2 章 并行产品数字化定义与数据管理	(30)
2.1 并行产品数字化定义	(30)
2.1.1 并行定义组织与管理	(30)
2.1.2 并行产品数字化定义的成熟度管理	(32)
2.1.3 并行定义的工艺工作内容与流程	(35)
2.2 产品数据管理	(41)
2.2.1 产品数据管理核心支持能力	(41)

2.2.2	协同工作平台	(42)
2.2.3	业务协同管理	(43)
2.2.4	工作流程控制	(46)
2.2.5	产品结构数据管理	(47)
2.2.6	其他数据管理	(57)
2.3	企业内部数据管理	(58)
2.3.1	数据动态打包应用	(59)
2.3.2	系统集成应用	(61)
第 3 章	装配工艺设计	(63)
3.1	装配工艺设计技术发展现状及趋势分析	(63)
3.1.1	发展现状及需求	(63)
3.1.2	趋势分析	(65)
3.2	装配工艺规划与详细设计	(65)
3.2.1	基于模型的工艺设计	(66)
3.2.2	基于模型的装配工艺设计系统	(69)
3.3	飞机装配协调设计	(74)
3.3.1	飞机装配协调	(74)
3.3.2	关键装配特性	(78)
3.4	容差分析与优化	(81)
3.4.1	容差分析	(81)
3.4.2	容差分配	(86)
3.5	装配过程仿真	(88)
3.5.1	装配过程仿真的发展与应用	(89)
3.5.2	装配仿真的相关概念与原理	(91)
3.5.3	基于 DELMIA 的数字化装配工艺仿真技术	(91)
3.5.4	基于虚拟现实的沉浸式装配仿真技术	(95)
3.6	基于专家知识的装配工艺决策	(100)
3.6.1	装配知识体系	(100)
3.6.2	装配工艺知识库	(102)
3.6.3	装配工艺智能决策	(104)
3.6.4	装配知识决策系统	(105)
第 4 章	飞机装配工艺技术	(110)
4.1	飞机部件装配技术	(110)
4.1.1	工艺分离面的划分	(110)
4.1.2	组合件装配	(110)
4.1.3	机身部件装配	(113)
4.1.4	部件对接装配	(116)
4.2	装配自动化设备	(122)

4.2.1	自动制孔设备	(122)
4.2.2	自动钻铆设备	(131)
4.3	飞机装配自动制孔工艺	(133)
4.3.1	复合材料加工特性	(134)
4.3.2	制孔刀具与工艺参数	(136)
第5章	数字化柔性装配工装	(138)
5.1	数字化柔性装配工装的构成	(138)
5.1.1	机械定位装置	(139)
5.1.2	柔性工装数控系统	(143)
5.1.3	柔性工装应用集成管理系统	(151)
5.1.4	在线测量系统	(154)
5.2	飞机装配中应用的典型柔性装配工装	(155)
5.2.1	组合件装配柔性工装	(155)
5.2.2	部件装配柔性工装	(160)
5.2.3	部件对接柔性工装	(169)
5.2.4	移动运输辅助装备	(172)
5.3	柔性工装发展趋势	(174)
5.3.1	移动式柔性工装	(174)
5.3.2	低成本柔性工装	(176)
5.3.3	柔性工装动态监控	(178)
第6章	飞机装配数字化测量	(179)
6.1	飞机装配过程中的测量类型与特点	(179)
6.1.1	空间点位测量	(179)
6.1.2	复杂曲面测量	(181)
6.2	通用测量设备与原理	(183)
6.2.1	关节臂测量机	(183)
6.2.2	经纬仪测量系统	(184)
6.2.3	全站仪测量系统	(185)
6.2.4	摄影测量系统	(185)
6.2.5	激光扫描测量系统	(187)
6.2.6	激光跟踪仪测量系统	(188)
6.2.7	室内空间测量系统	(190)
6.2.8	通用测量设备的组合运用	(191)
6.3	测量系统建立及环境控制	(195)
6.3.1	基于激光跟踪仪的测量控制网	(196)
6.3.2	基于室内空间测量系统的全局测量控制网	(197)
6.3.3	测量环境的控制	(199)
6.4	飞机部件数字化测量案例	(201)

6.4.1	部件结构与测量规划	(201)
6.4.2	测量过程	(204)
6.4.3	测量数据处理与分析	(208)
第7章	飞机装配生产线规划	(214)
7.1	飞机装配生产线概述	(214)
7.1.1	现代飞机装配生产线形式	(214)
7.1.2	现代飞机装配生产线的特点	(216)
7.2	生产线规划	(218)
7.2.1	产能分析与能力平衡	(218)
7.2.2	生产线工艺布局	(225)
7.3	生产线规划案例分析	(227)
7.3.1	座舱盖装配生产线规划	(227)
7.3.2	后机身产能求解分析与优化	(233)
第8章	数字化装配生产线管理	(247)
8.1	装配生产线管理特点与内容	(247)
8.1.1	装配生产线管理特点	(247)
8.1.2	装配生产线管理内容	(248)
8.2	装配生产计划与资源管理	(248)
8.2.1	企业进度计划体系	(248)
8.2.2	装配生产作业计划管理	(256)
8.2.3	零件、标准件及成品管理	(256)
8.2.4	工装、工具管理	(259)
8.3	装配现场管理	(259)
8.3.1	派工管理	(259)
8.3.2	生产用文件管理	(259)
8.3.3	制造记录管理	(260)
8.3.4	变更管理	(260)
8.3.5	产品保留与移交管理	(261)
8.4	装配管理信息平台	(262)
8.4.1	装配生产执行管理信息系统	(263)
8.4.2	数字化装备运行控制管理系统	(264)
8.5	装配生产执行管理系统应用案例	(265)
8.5.1	系统建设规划与要求	(265)
8.5.2	系统主要模块及其功能	(266)
参考文献		(280)
缩略语表		(289)

第 1 章 飞机装配技术概述

自 1903 年 12 月美国莱特兄弟发明飞机，为人类插上翅膀以来，飞机制造技术已走过 100 多年的发展历程，随着近几十年现代先进制造技术的不断进步，航空制造业也进入了快速发展的时期。飞机装配是飞机制造中最为重要的环节，其技术难度大、涉及面广。

1.1 飞机装配特点与发展趋势

飞机是一种外形复杂、零部件数量巨大、协调关系复杂的产品，其装配过程与方法都有别于一般的机械产品。装配技术的发展改变了完全依赖手工进行飞机装配的生产方式，自动化设备和脉动式生产线使飞机能够快速大批量生产。

1.1.1 飞机装配特点

飞机装配是将各零件或组合件按产品技术要求相互准确定位，并用规定的连接方法装配成部件或产品的过程。受结构特点和结构刚性等因素影响，在飞机装配中大量采用铆接和螺接等连接手段。同时，为了保证装配协调及外形准确度要求，并保证装配过程中组件、部件具有一定的结构刚度，飞机装配中采用了大量的结构复杂、准确度高的装配型架。这一切均显示出，与一般机械产品的装配过程相比，飞机装配具有非常显著的特点。

(1) 产品几何定义与协调方法

由于飞机零件形状复杂，难以在二维图样上用尺寸描述零件的尺寸和形状，长期以来一直用模线样板的方式进行飞机产品的几何定义，图 1-1 所示为用于尺寸定义的模线图，图 1-2 为样板图。随着计算机技术的发展，20 世纪 70 年代产生了计算机辅助设计制造技术，飞机的几何尺寸与形状定义采用了以 B 样条等函数构建的三维线架结构，使模线由人工绘制变为由绘图机自动绘制，复杂的机械加工可以利用零件的数模进行编程，实现数控加工。直到 20 世纪 90 年代，以波音、空客为代表的三维数字化设计制造技术应用，彻底改变了飞机设计制造模式。

(2) 装配工艺装备的特点与作用

飞机结构不同于一般机械产品，在它的装配过程中，不能仅仅依靠零件自身形状与尺寸的加工精度来保证装配出合格的组、部件。因此，除了采用各种通用机床、常用工具和试验设备以外，还需针对不同机型的组件及部件，制定专门的装配工艺装备（工装），如装配型架、对合型架、精加工型架、壁板装配夹具等。这些专用的生产装备用于完成飞机产品从零组件到部件的装配以及总装配过程，一般尺寸较大的称为装配型架，而尺寸较小的称为装配夹具，二者不存在严格、明确的界限。

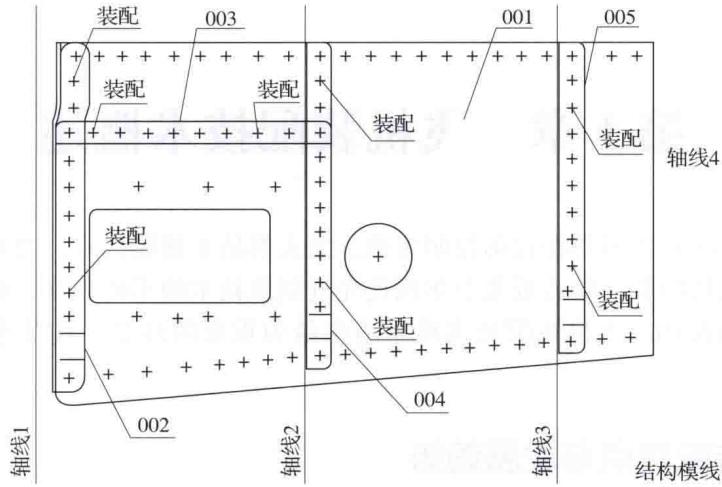


图 1-1 模线图

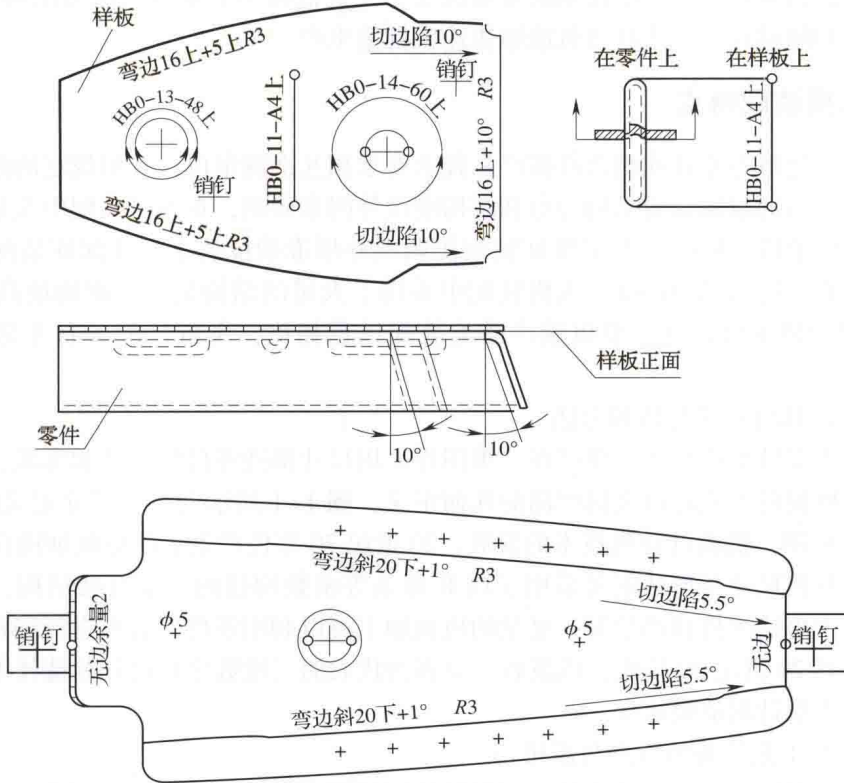


图 1-2 样板图

装配工装的主要功用有如下几点：①定位夹紧，保证产品的尺寸、形状和零件间相对位置的准确性。②确保产品满足准确度和协调互换的要求，在一般机械制造中，保证产品互换性主要是通过公差、配合制度和通用量具来实现，而飞机制造中则是通过相互协调的装配工装来实现。③保持尺寸形状稳定性，飞机结构中存在大量钣金件，其尺寸大而刚性

小,所以无论是铆接还是焊接,在连接时都会产生不同程度的变形,而装配工装能够确保钣金件及其组合件的形状,控制装配过程的变形。④改善装配过程的劳动条件,提高劳动生产率,降低成本。

在批生产中,一个部件的装配往往需要用一套具有多种功能的工装完成全部的装配工作,如骨架装配夹具、总装型架、架外补铆型架等。这种情况下,每个工装必须与装配过程前后相关的工装相互协调,同时还需要与相关的零件工装协调。

(3) 装配连接方式

飞机的机体结构由上万项零件组成,连接方式以铆接为主。铆接的优点是连接强度稳定可靠,易于检查和排除故障,能适应较复杂的结构和不同材料之间的连接且操作技术简便易行。但是铆接也存在自身的缺点,主要表现在:铆缝应力分布不均匀;手工劳动量大,生产效率低;铆接质量受人为因素影响较大,不易控制。

为了解决人工钻铆所出现的问题,能够完成定孔位、制孔、送钉、施铆全过程的自动钻铆设备开始出现。随着数控技术的发展,自动钻铆技术日益成熟,出现了不同结构形式的自动制孔设备和与其配套的自动调平托架。自动钻铆设备本身比较庞大,与人工铆接相比其灵活性较差,因此适合铆接工作面开敞的部组件,常用于大型飞机铆接装配。对于战斗机中空间狭小且铆接部位形状复杂的装配件而言,其应用受到了一定的限制。为此,目前又出现了各种类型的自动制孔设备,如机器人自动制孔设备、五坐标自动制孔设备等。

1.1.2 飞机装配发展趋势

从20世纪50年代以来,数字化技术在国外航空工业中的应用,经历了从数字化技术的单项应用,到数字化系统集成应用,再到数字化协同设计制造和产品全寿命周期数据管理的发展历程。以波音公司为例,其数字化设计制造技术的发展历程如图1-3所示。波音公司在20世纪90年代研制波音777飞机的过程中已全面实施了产品数字化设计,该型



图 1-3 数字化设计制造技术在波音公司的发展和应用

飞机作为世界上第一种全数字化定义和无纸化生产的飞机，是飞机制造业全面应用数字化技术的里程碑。欧洲的空客公司也建立了多地区、多制造厂之间的飞机异地协同数字化设计制造及管理体系，为空中“巨无霸”飞机 A380 的成功研制提供了坚实的数字化技术应用基础。

目前，飞机数字化设计制造技术已在波音、洛克希德·马丁、空客等公司的飞机研制过程中广泛应用，先进飞机设计制造技术以全面采用数字化产品定义、产品数据管理、并行工程和虚拟制造技术为主要标志，从根本上改变了飞机传统的设计制造方式，大幅度提高了制造技术水平，并取得了良好的效益。例如，空客公司采用虚拟制造技术，将其新机试制周期从 4 年缩短为 2.5 年，显著降低了研制费用及生产成本。又如，图 1-4 中将传统设计制造流程与数字化并行设计制造流程进行了对比，由图可知，飞机并行设计制造流程采用数字化产品数据管理以及数字化制造管理等模式，将飞机工艺设计及工装制造等环节大幅提前，使得飞机试制周期缩短约 50%。

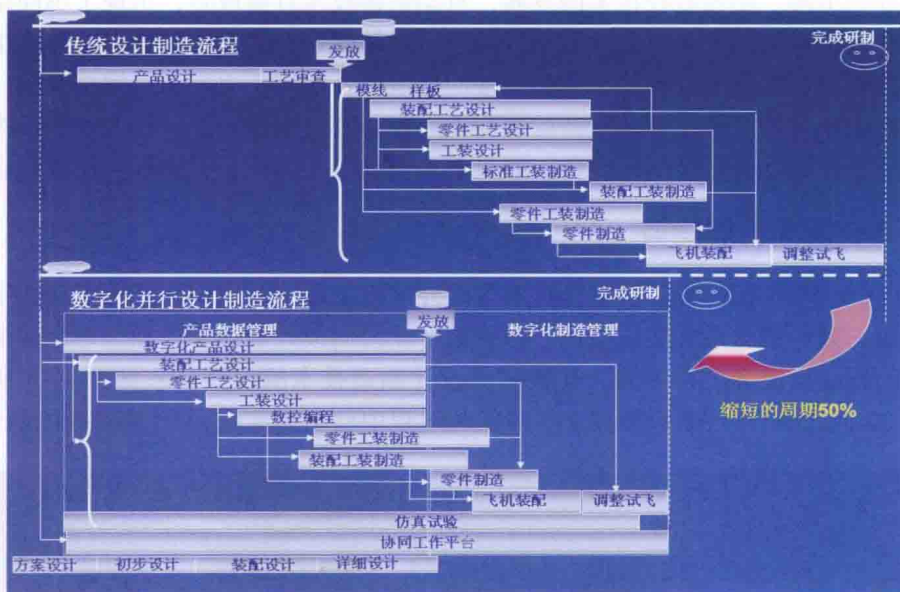


图 1-4 传统设计制造流程与数字化并行设计制造流程的对比

飞机数字化装配技术兴起于 20 世纪 80 年代后期，并在西方航空工业发达国家获得了迅速发展。数字化装配技术集成了工业界各领域最先进的科技成果，如数字化技术、虚拟现实技术、激光跟踪定位技术、自动控制技术等，它已经完全不同于传统的飞机装配技术。现代飞机数字化装配技术以自动化、数字化、柔性化与信息化为特点，显著提高了飞机装配质量和效率，同时也提高了飞机的疲劳寿命。

目前，波音公司和空客公司代表了全球航空制造业的最先进水平，其数字化装配技术体系已逐渐成熟。在波音 777/787 飞机、空客 A380 飞机等的研制过程中，机身部件的装配均已采用数字化装配技术。同时，为适应飞机数字化装配技术发展的要求，国外相关的设备制造公司与飞机制造公司合作，不断在数字化装配技术及装备方面进行探索研究。在各种新机型研制过程中，飞机数字化装配技术也在不断向前发展。

目前国内飞机数字化设计制造水平正在不断地提高。数字化的软硬件环境已初具规模，飞机设计已由三维几何模型设计向全信息三维模型设计方向发展，厂所并行协同工作环境已经形成，并已初步建立起并行协同工作管理机制和流程。数字化技术已从单项技术应用向集成化技术应用发展，仿真技术应用越来越广泛，已成为产品设计、工艺设计的必备手段和必需环节。数字化技术在新型号飞机研制中取得了显著效益，国内几大主机厂已普遍采用数字化协调技术，取消了大量的标准工装，降低了飞机研制成本，缩短了飞机研制周期。数字化制造管理技术正不断被采用，已成为企业生产经营管理不可缺少的工具，并正在向着三维可视化方向发展。

先进工业技术的发展推动着飞机装配发生了根本性的变革，并逐渐形成了数字化飞机装配技术体系，其采用的新概念与新技术主要体现在如下几个方面。

(1) 数字化的设计理念

在研制波音 777 飞机的过程中，波音公司提出了数字化产品定义（Digital Product Definition, DPD）的概念，第一次实现了“无纸设计”（数字化），全面采用数字化技术来实现三维数字化定义、三维数字化预装配和并行工程，建立了全机的数字样机，取消了全尺寸实物样机。

为了使三维模型能够更有效地应用于并行产品数字化定义，并能够更直接地用于生产，波音公司又推出了基于模型定义（Model Based Definition, MBD）的飞机产品数字化定义方法。美国机械工程师协会于 2003 年发布了数字产品定义规范（ASME Y14.42-2003），对三维计算机辅助设计（Computer Aided Design, CAD）软件提出了非几何信息建模和工程信息标注等功能要求，这直接促进了 CAD 软件三维标注功能的发展，目前主流的 CAD 软件公司已把此标准设计到软件中。波音等航空制造商在此标准的基础上都根据公司具体实践相继制定了基于模型定义的系列标准，并与产品设计软件 CATIA 和装配仿真软件 DELMIA 集成。

基于模型的产品定义用一个集成的三维实体模型完整地表达产品定义信息，将设计信息和制造要求信息（三维尺寸标注及各种制造要求信息）显性化、结构化地共同定义到产品的三维数字化模型中。这样既可以取消二维工程图，也便于后续的数据处理，同时保证了设计数据源的唯一性。基于模型驱动的设计制造基本上不存在中间数据传递环节，消除了形状与尺寸的传递误差，进而保证了飞机产品的研制质量。

(2) 柔性装配工艺装备技术

随着数字化飞机装配技术的发展，传统装配工装的数量呈现出明显减少的趋势。这对于降低新机研制成本，缩短研制周期起到了巨大的作用，并能够大幅提高产品的装配质量。

在国外新型飞机装配系统中，装配工装已经发展成类似于数控设备的自动化工装，其中主要包括多点阵真空吸盘式和分散式柔性装配工装，具有模块化、数字化、柔性化、自动化的特点。例如，机身结构装配工装采用了激光跟踪定位和数字控制技术（Computer Numerical Control, CNC），此类工装代替了传统大型装配型架，实现了装配的自动化和柔性化，在 F-35 等飞机的制造中得到了普遍应用。图 1-5 为一种机身骨架结构通用装配工装，图 1-6 为一种柔性可调的机身部件定位支撑工装。这些工装采用模块化设计，结构简单，每组定位器接头均可设计为一个组合模块。

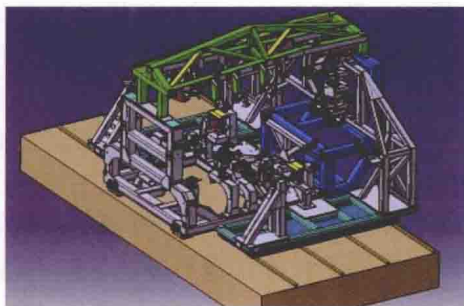


图 1-5 一种机身骨架结构通用装配工装

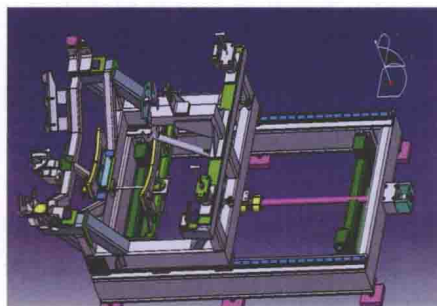


图 1-6 一种柔性可调的机身部件定位支撑工装

(3) 数字化连接技术

装配过程中的零组件装配、部件装配和部件对接装配过程都需要进行大量的制孔、铆接等连接工作。在先进飞机装配技术的发展过程中，数字化连接方面已经有了革命性的发展与创新。较先进的数字化连接技术包括自动制孔技术、电磁铆接技术、机器人辅助装配技术等。图 1-7 显示了国外采用柔性工装和机器人进行数字化自动制孔与钻铆的情况。它们将机器人集成到装配系统中，并与柔性的装配工装结合使用，完成产品零部件的移动、精确定位、钻铆、修边、测量等部件装配过程中的多种重要工作。

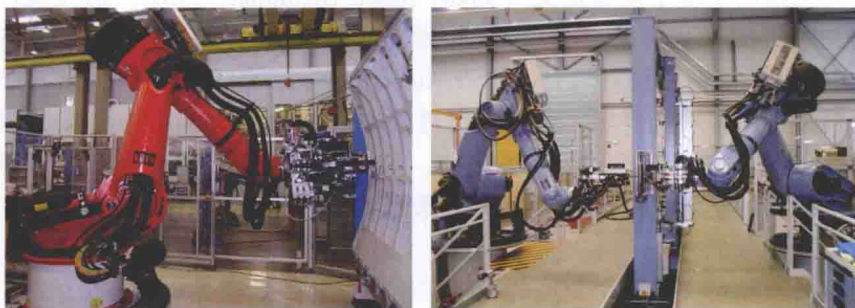


图 1-7 机身壁板自动制孔与钻铆

(4) 数字化自动对接技术

在飞机总装时，国外各大飞机制造公司均以数字化自动对接系统代替了传统的大型固定对接型架，系统主要由自动化定位器、激光测量系统（激光跟踪仪、激光雷达或室内空间定位测量系统（indoor Global Positioning System, iGPS））和控制系统组成，数字化对接平台系统可大幅提高机体装配质量，并且能够适应不同尺寸的机身机翼结构，通用性强，可节省大量装配工装。图 1-8、图 1-9 所示为自动化对接平台在飞机总装中的应用情况。

(5) 移动控制技术

在 F-35 飞机研制中，洛克希德·马丁公司首次将连续不间断的移动装配线用于战斗机生产，其主要目的是对大部件或部段工作站位转移进行精确控制和自动移动。采用这种装配方式能够提高生产效率，节省操作空间。这种崭新的移动技术也应用于空客的新机装配生产中，图 1-10 所示即为空客公司采用的一种重载自动导引运输车（Automated Guided Vehicle, AGV）。