




北京市高等教育精品教材立项项目

贾玉红 何景武 编著

现代飞行器制造工艺学

 北京航空航天大学出版社



北京市高等教育精品教材立项项目

现代飞行器制造工艺学

贾玉红 何景武 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书介绍了飞行器制造技术的基本原理和基本方法,并对飞行器制造过程中钣金零件的成形、先进复合材料结构件的制造、飞行器零部件的制造、飞行器装配工艺及飞行器产品数字化制造技术和并行工程等进行了系统的阐述。本书将传统的飞行器制造工艺和现代先进的飞行器制造技术相结合,体现了内容的系统性、完整性、先进性和综合性。

本书可以作为航空航天院校非制造工程专业的基础教材,也可作为从事相关专业人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

现代飞行器制造工艺学 / 贾玉红,何景武编著. --北京:北京航空航天大学出版社,2010.8

ISBN 978-7-5124-0160-0

I. ①现… II. ①贾…②何… III. ①飞行器—制造 IV. ①V47

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 141180 号

版权所有,侵权必究。

现代飞行器制造工艺学

贾玉红 何景武 编著

责任编辑 张军香 刘福军

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: bhpess@263.net 邮购电话:(010)82316936

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:14.5 字数:325 千字

2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷 印数:3000 册

ISBN 978-7-5124-0160-0 定价:29.00 元



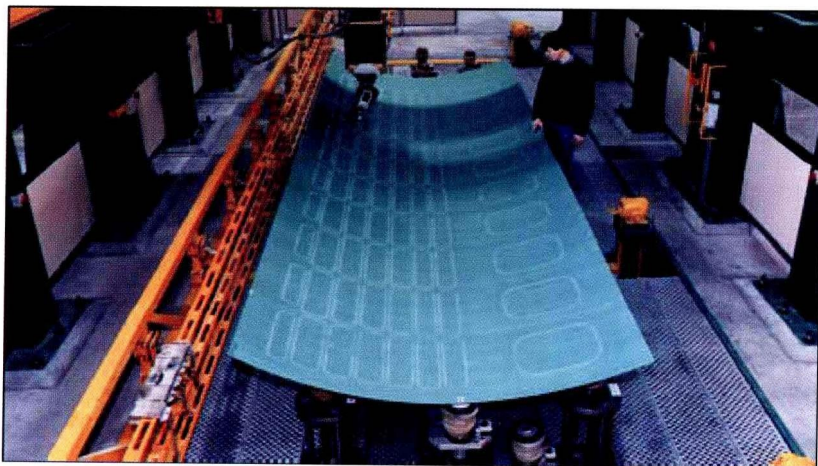
飞机总装车间



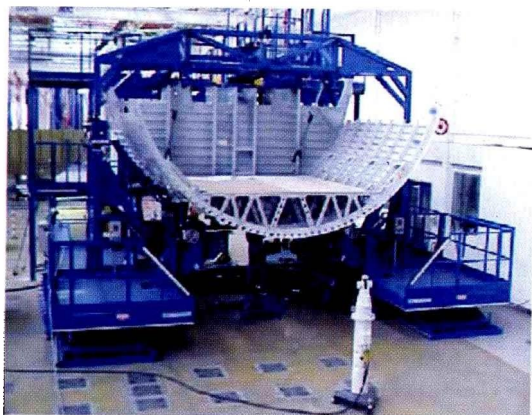
机器人钻铆系统



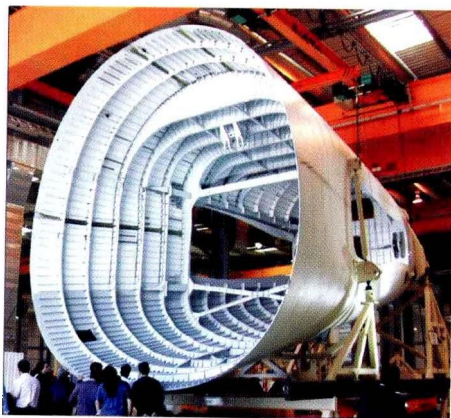
数字化装配系统



用激光切割技术加工复合材料机身壁板



用激光跟踪仪对飞机的部件进行定位



A380的复合材料机身后段



具有柔性夹具的壁板数控钻孔单元



装配工作站的定位机构

前 言

飞行器制造技术和制造模式是随着国家科学与技术的进步而不断发展的,是一个国家航空航天技术发展水平的重要标志。先进的航空航天制造技术是飞行器加速发展的基础,是降低制造成本,提高经济效益的重要手段,是飞行器制造质量和可靠性的有力保障。

本书结合航空航天产品和技术的发展,首先对飞行器的制造特点、制造技术和制造模式进行了阐述,并结合传统的制造工艺,对现代飞行器制造工业中先进的制造工艺和加工方法、复合材料结构件的成形与制造技术、特殊加工技术、飞行器装配工艺及飞行器数字建模及制造技术和并行工程等内容进行了介绍。内容力求通俗易懂,图文并茂。本书以传统的飞行器制造工艺为基础,系统阐述了现代飞行器制造工艺及两者的结合,使本书达到系统性、完整性和先进性的统一。

本书在编写过程中以《飞机制造工艺学》(徐冰清,刘玉芳编,北京航空航天大学出版社出版)教材为蓝本,并参考了范玉青教授的《现代飞机制造技术》和《大型飞机研制技术文集》等资料以及兄弟院校(单位)的相关教材和相关文献。所参阅和借鉴的资料目录已列入书后的参考文献中,在此谨向所有提供资料的老师和同行表示最衷心的感谢!

本书共分5章,其中第1~2章和4~5章由贾玉红编写,第3章部分内容由何景武编写。由于编写人员知识和经验有限,本书在编写过程中难免会有不当和错误之处,敬请各位同行和广大读者批评指正。

编 者

2010年3月

于北京航空航天大学

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 飞行器研制的一般过程	1
1.2 现代飞行器制造工艺的技术特点	2
1.2.1 飞行器产品的特点	3
1.2.2 飞行器制造工艺的技术特点	4
1.3 现代飞行器制造的先进技术及关键技术	7
第 2 章 飞行器零件的制造	11
2.1 钣金零件的成形原理.....	11
2.1.1 钣金零件变形的基本原理及特点.....	12
2.1.2 钣金零件成形过程及热处理.....	13
2.1.3 钣金件的表面处理.....	15
2.2 钣金零件的下料.....	15
2.2.1 剪 裁.....	16
2.2.2 铣 切.....	17
2.2.3 锯切与熔切.....	18
2.3 钣金零件的成形方法.....	18
2.3.1 冲压零件的制造.....	18
2.3.2 蒙皮零件的成形.....	37
2.3.3 液压零件的成形.....	45
2.3.4 型材零件的成形.....	49
2.4 整体零件的成形.....	56
2.4.1 整体壁板的成形.....	56
2.4.2 整体梁框类零件的加工.....	66
第 3 章 复合材料零件的成形与制造技术	74
3.1 复合材料的特点及在飞行器上的应用.....	74
3.1.1 复合材料的特点	74
3.1.2 复合材料在飞行器上的应用	76
3.2 复合材料成形与制造	81
3.2.1 复合材料制备技术特点	81

3.2.2	聚合物基复合材料成形加工技术	81
3.2.3	金属基复合材料成形加工技术	89
3.2.4	陶瓷基复合材料加工技术	90
3.3	复合材料的机械加工	90
3.3.1	钻孔与镗窝	90
3.3.2	切割	90
3.4	复合材料的质量控制与检测	91
3.5	典型飞行器复合材料构件制造实例	93
第4章	飞行器装配工艺	96
4.1	飞机装配的基本问题	96
4.1.1	设计分离面与工艺分离面	96
4.1.2	飞机装配准确度	98
4.1.3	提高装配准确度的方法	100
4.1.4	装配基准	104
4.1.5	装配定位	106
4.2	装配连接技术	110
4.2.1	机械连接技术	110
4.2.2	结构胶接技术	138
4.2.3	焊接技术	150
4.2.4	胶焊连接工艺	155
4.3	保证互换与协调的方法	156
4.3.1	互换与协调	157
4.3.2	模线-样板工作法	163
4.3.3	飞机制造工艺装备	171
4.3.4	飞机部件装配的典型协调系统	177
4.4	飞机总装及机场工作	183
4.4.1	飞机总装的内容	183
4.4.2	飞机各部件的对接及水平测量	185
4.4.3	各系统、设备的安装、调整和检验	187
4.4.4	飞机总装工作的特点	189
4.4.5	机场车间工作	191
第5章	飞机数字化设计制造技术	192
5.1	数字化设计制造技术的概念、内容和过程	192
5.1.1	数字化设计与制造的概念	192

5.1.2 数字化设计与制造的内容	193
5.1.3 飞机数字化设计与制造过程	196
5.2 飞机数字化设计过程	197
5.3 飞机数字化制造过程	201
5.4 飞机数字化装配系统	205
5.4.1 飞机数字化装配系统的工作原理	205
5.4.2 数字化标准工装	206
5.4.3 飞机柔性装配系统	208
5.4.4 数字化测量与定位技术	211
5.5 并行协同模式在飞行器制造中的应用	215
5.5.1 并行工程	215
5.5.2 并行工程的关键技术	219
5.5.3 并行协同的研制模式	220
参考文献	223

第 1 章 绪 论

飞行器制造技术和制造模式是随着一个国家的科学与技术的进步而不断发展的,是国家经济实力和综合国力的重要体现,是国家航空航天技术水平的标志。世界各国经济上的竞争主要是制造技术的竞争,据统计,在各个国家企业生产力的构成中,制造技术的作用占 60% 左右。目前一些发达国家已将制造科学、信息科学、材料科学与生物科学一起列为当今时代的四大支柱科学。半个多世纪以来,特别是 20 世纪 50 年代以后,工业发达国家航空航天技术之所以能持续高速发展,飞行器不断更新换代,除了这些国家拥有较高的科学技术和雄厚的工业基础外,最根本的原因是他们高度重视现代航空航天制造技术的发展,并以此作为在国际市场竞争中保持竞争优势的手段。先进制造技术是降低成本、提高经济效益的重要手段,是飞行器质量和可靠性的保证。

1.1 飞行器研制的一般过程

飞行器是指在大气层内或大气层外空间飞行的器械,其种类包括航空器、航天器、火箭和导弹。各类飞行器由于飞行环境和功能的不同,其结构也有很大差异。在各类飞行器中,飞机结构设计及其制造过程最具代表性,因此,下面就以飞机为例介绍飞行器制造的一般过程。

通常飞机制造仅指飞机机体零构件制造、部件装配和整机总装等。飞机的其他部分,如航空发动机、仪表、机载设备、液压系统和附件等由专门工厂制造,不列入飞机制造范围。但是它们作为成品或半成品在飞机上的安装和整个系统的联结、电缆和导管的敷设,以及各系统的功能调试都是总装的工作,是飞机制造的一个组成部分。

飞机的制造过程通常包括工艺准备、毛坯制备、零件加工、装配总装、检测和试飞几个阶段。

(1) 工艺准备

在传统的飞机制造过程中,工艺准备工作包括制造过程中的协调方法和协调路线的确定,以及工艺装备的设计等。由于飞机零部件具有尺寸大,形状复杂,刚度小等特点,其制造过程常采用不同于一般机械制造的协调技术(如模线-样板工作法)和大量的工艺装备(如各种工夹具、模胎和型架等),以保证所制造的飞机具有准确的外形和装配准确度。随着飞机数字化制造技术的发展,工艺准备工作也大大简化。

(2) 毛坯的制备

20世纪90年代以前,飞机结构常用的材料主要是铝合金、钛合金、镁合金等,并多以板材、型材和管材的形式由冶金工厂提供。此外,飞机上还大量采用锻件和铸件,如机身加强框、机翼翼梁和加强肋等多用高强度铝合金和合金钢锻造毛坯,这些大型锻件需要在300~700MN(3~7万吨力)的巨型水压机上锻压成形。目前,现代先进飞机已开始大量采用复合材料,以进一步减轻飞机的结构重量,提高飞机的飞行性能。

(3) 零件加工

零件加工主要有钣金零件成形、机械加工和非金属材料加工。金属零件在加工中和加工后一般还要进行热处理和表面处理,其加工技术和加工方法已相当成熟。随着科学技术的发展,近年来飞机制造技术也发生了巨大的变化,主要体现在传统技术不断精化、新材料、新结构、新成形技术不断涌现,集成的整体结构和数字化制造技术构筑了新一代飞机制造技术的主体框架。从现代飞机结构来看,金属材料与复合材料将在长时间内继续担当飞机结构材料的主角,而新兴先进复合材料的成形和加工技术将是未来发展的重点。

(4) 飞机装配和总装

飞机零件加工完成后,装配成为飞机制造成败的关键。在传统的飞机装配过程中,按飞机的构造特点分段进行装配。首先将零件在型架中装配成翼梁、框、肋和壁板等构件,再将构件组合成段件(如机身前段、中段和尾段)和部件,最后完成一架飞机的对接。装配中各部件外形靠型架保证,对接后的全机各部件相对位置、气动外形参数(如机翼安装角、后掠角、上反角等)和飞机的对称性等,要通过水平测量和先进的数字测量方法来检测。

飞机的总装工作还包括发动机、起落架的安装调整,各系统电缆、导管的敷设,天线和附件的安装及各系统的功能试验等。

(5) 试验和试飞

总装完成后,飞机即可进行外场试飞,新机试飞应按试飞大纲要求逐项进行。经过设计定型后,新机可能还会有一定改进,特别是工艺性改进,改进后的飞机可以进入批量生产。

成批生产的飞机,飞行试验有两种:一种是移交试飞,针对每架飞机必须进行,试飞时检查的项目不多,只对飞机的主要性能进行鉴定。另一种是成批试飞,对一批飞机,抽出少数几架飞机试飞,检查的项目比移交多,以便更全面地检查这一批飞机的制造质量。成批生产的飞机,在试飞合格后移交给订货方。移交时除飞机本身外,还包括备件和随机工具,以及飞机、发动机、仪表和设备的合格证和履历书等。

1.2 现代飞行器制造工艺的技术特点

由于飞行器产品本身在其结构及使用方面的固有特征,使其制造工艺和其他机械产品有着重大的差别,并且随着科技的进步不断发展变化着。

1.2.1 飞行器产品的特点

以飞机产品为例,飞行器产品有以下特点:

1. 零件数量大、品种多

飞机不但结构复杂,而且其内部空间十分紧凑,各类系统布置密集(如机上载有各种设备、仪表和附件等二十几个系统),因此,一架飞机的零件不仅数量很大,而且品种很多。一般来说,一架飞机的零件数量可达数十万,一架大型飞机的零件数量可达数百万,如 B777 的零部件数量约有 300 万个,A380 飞机上除了上百万的零部件以外还有约 450 多公里的电缆和 4 万余个接头,可见零件数量之巨大。

2. 外形复杂,精度要求高

飞机各部件大多具有不规则的曲面外形,外形非常复杂。作为飞机产品,它的战术-技术特性和使用可靠性等指标又决定了对其精度要求很高,尤其是接触气流的飞机表面,不仅对它的表面光洁度有很高的要求,而且对其外形准确度也提出了很高要求。

3. 零件尺寸大,刚度小

飞机外形尺寸很大,有的飞机机翼长达几十米,而机翼本身又是薄壁结构,刚度小,易变形,因此飞机结构的精确度不易保证。在飞机装配过程中,由于钣金件刚性小,需采用大量复杂的型架等工艺装备来保证飞机结构的形状和尺寸。因此,在飞机生产中,零部件的装配和部件对接装配一直是飞机生产过程中最费时费力的一个重要环节。

4. 材料品种多、新材料应用比例大

飞机中大多数零件是用有色金属制造的,其他则选用黑色金属及非金属材料。例如 MD-82 飞机的结构材料中,铝合金占 74.5%,钢占 14.5%,钛合金占 1.2%,非金属占 9.8%。随着飞机飞行速度、飞行高度的不断增加,以及材料技术的发展,复合材料在飞机结构中所占比例越来越高,如 A380 上仅碳纤维复合材料的用量就达 32 t 左右,占结构总质量的 15%,再加上其他种类的复合材料,复合材料总用量达 25% 左右。再如世界先进的民用客机 B787 机体主要结构大规模地采用复合材料,复合材料用量由 B777 飞机的 12% 一步跨越到 50% (如图 1-1 所示)。这种由复合材料机身组成的 B787 客机,维修成本可节省 30%,燃油可节省 20%,飞行的舒适性也得到很大提高。

5. 结构不断改进,产量变化范围大

为保持国防军事实力,掌握制空权、制天权,以及在激烈的市场竞争中保持竞争优势,需要加快飞机的型号更新,因而其结构需要经常修改、变动。例如某型号战斗机,为了提高性能和满足各种特殊用途的需要,往往要在原型机的基础上设计多种型号,如空军型、海军型、侦察型

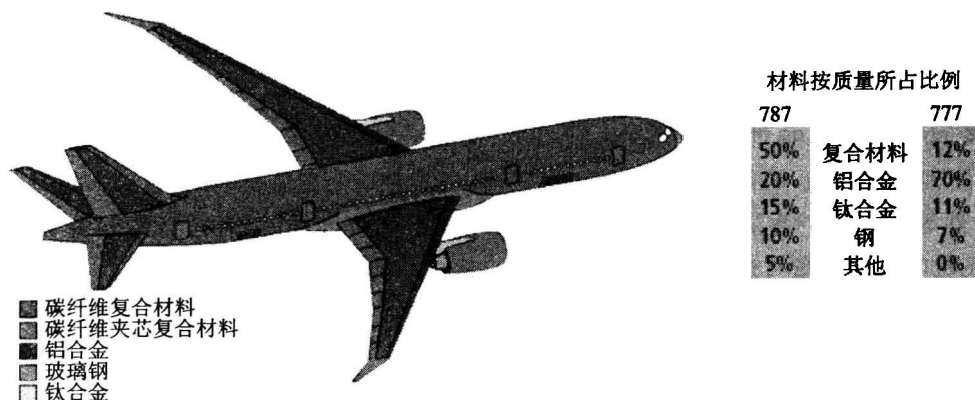


图 1-1 B787 机体结构复合材料用量示意图

和教练型等。如美国的 F-4 飞机,在十几年的生产中 共有 13 种改型(图 1-2 所示分别为用于轰炸的 F-4F 型飞机和用于攻击的 F-4E 型飞机)。同时,由于市场需求的变化,飞机的产量变化范围较大,尤其是军用飞机,在战时要求迅速扩大产量,以满足战争不断消耗的需要。

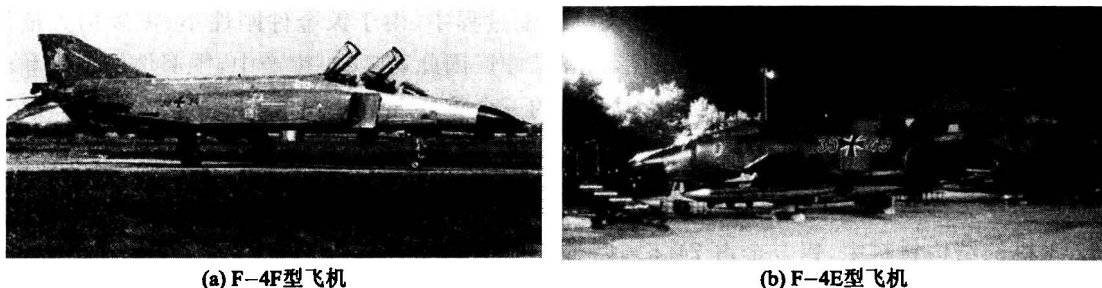


图 1-2 F-4 飞机的改型

上述飞机产品的特点都直接对产品的设计、工艺及组织生产产生影响,因此必须加以充分考虑。

1.2.2 飞行器制造工艺的技术特点

飞行器制造是以一般机械制造工程为基础,广泛吸收各种先进制造技术和加工工艺的研究成果,专门针对飞行器的特点发展起来的各种制造方法及其应用。现代航空航天制造业是集机械、电子、光学、信息科学、材料科学、生物科学、激光学、管理学等最新成就为一体的新技术的 综合体,其要求远远高于一般机械制造技术。飞行器制造技术和一般的机械制造技术相

比,其特点主要体现在以下几个方面:

1. 航空航天产品具有特殊性

从航空航天产品的特点可以看出,航空航天产品普遍存在结构复杂、工作环境恶劣、质量轻、可靠性高的特点。

从设计要求看,多采用新结构、新材料,零件的几何形状复杂,零件加工精度、表面光洁度要求高。

从生产要求上看,研制、准备周期长,工艺装备品种多、数量大,更新换代快,批量不是很大,制造工艺技术要适应多品种、小批量和柔性制造的特点。

2. 加工方法具有多样性和先进性

现代飞行器所用的航空航天材料最大的特点是强度高、刚度大而质量轻,要求具有好的耐高温和抗低温性能及良好的耐老化和抗腐蚀能力,有足够的断裂韧性和良好的抗疲劳性能。因此大量采用高温合金、钛合金、高强度钢、复合材料和工程陶瓷等材料。这些材料加工性能差,需要使用特殊设备以及特种加工工艺。一般机械制造的基本加工技术在飞行器制造中大多都得到了应用,但对于飞行器制造中大量使用的高强度钢、钛合金和高温合金等难切削材料的加工、微米级以上的精密加工和超精加工,是一般机械制造技术所难达到的。为此发展了各种靠模机床、多坐标联动大型数控机床和各种测量仪器及其他特种加工方法。对于整体薄壁结构、复杂形面的零件,需要采用大量的工艺装备和高精度的多坐标数控机床加工;对于轻型焊接结构件,需要采用真空电子束焊、搅拌摩擦焊及真空焊等先进焊接技术;动力装置各种小孔多,其形状、尺寸精度以及表面质量要求高,需采用激光、电子束、电火花和电解等特种加工技术;盘类零件的辐板、轴的深孔加工,由于形状复杂,须采用其他先进机械加工技术和新的工艺方法。

图1-3所示为利用激光切割技术加工的复合材料机身壁板零件。

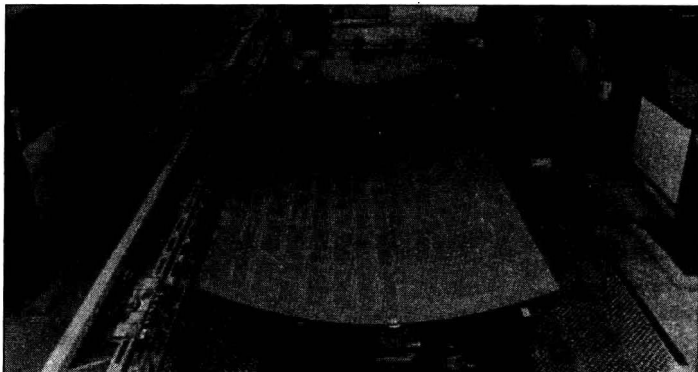


图1-3 激光切割壁板

3. 生产上具有适应性和灵活性

一般来说,由于飞机结构经常修改,生产批量不大,生产方法需要有较大的机动性,既能满足小批量生产的要求,又能适应成批生产。为此,必需尽量提高设备及工装的通用化程度,这就必然会降低装配和安装工作的机械化和自动化程度,大大增加了手工劳动量,使劳动生产率下降。现代飞行器制造技术必须在生产上简化工装,发展适应多品种、小批量生产的加工技术,以降低单件成本、缩短研制和生产周期。因此,飞行器制造工艺要有高度的柔性和应变能力,并且有必要在计算机技术和数控技术基础上建立柔性制造系统,以灵活地适应生产任务和条件的变化。

4. 具有严格的质量监控

飞行器质量的优劣直接影响产品的使用安全和乘员的生命。一架大型客机关系到数百名乘客的生命,航天飞机中一个小零件的失灵可能会造成无可挽回的巨大损失。因此,制造过程中应该完全杜绝由于质量不高造成的事故。飞行器零件的加工技术要求高,需采用精密、超精密加工和检测技术。由于飞行器对质量有较严格的要求,设计中选择的安全系数比一般机器小得多,工作条件又很严酷,加上构造复杂,要求飞行器制造具有更为严格的工艺规程和质量监控体系,确保制造质量的稳定性。现代飞行器的生产必须从设计开始到原材料入库、零部件加工、装配、产品的检验和试验、保管和运输实行全过程质量控制,才能保证飞行器使用的可靠性和安全性。

5. 具有高度、广泛的生产协作

由于飞机机体内的设备、仪表、附件及很多特种材料、半成品、毛坯等不可能全部由飞机制造工厂生产,而由其他专业化企业制造,因此,需要厂际之间的广泛合作。随着飞机制造工业的发展,这种生产协作必然会不断扩大,国内、国际间的协作也将不断增强。例如,1985年上海飞机制造厂与美国麦道公司合作组装生产 MD82 客机;1992年起双方又启动了新型号 MD90 的组装;2006年天津保税区、中国航空工业第一集团公司和中国航空工业第二集团公司组成的中方联合体与空中客车公司签署共同组建 A320 系列飞机总装生产线的框架协议。2009年空中客车公司与中国航空工业集团公司西安飞机工业(集团)有限责任公司签署 A320 系列飞机机翼总装项目合作协议。

20世纪90年代后,随着世界政治格局的变化以及经济全球化,世界航空工业正在全球范围内形成设计、生产与市场的全球化,降低飞机全生命周期内的成本以及提高飞机质量已成为现代飞机研制的重要指标。飞机制造业的这种广泛深入的合作,不但会使飞机制造公司获得最大的经济效益,还将进一步促进世界航空航天制造技术的发展。图1-4所示为B787飞机全球化生产示意图。

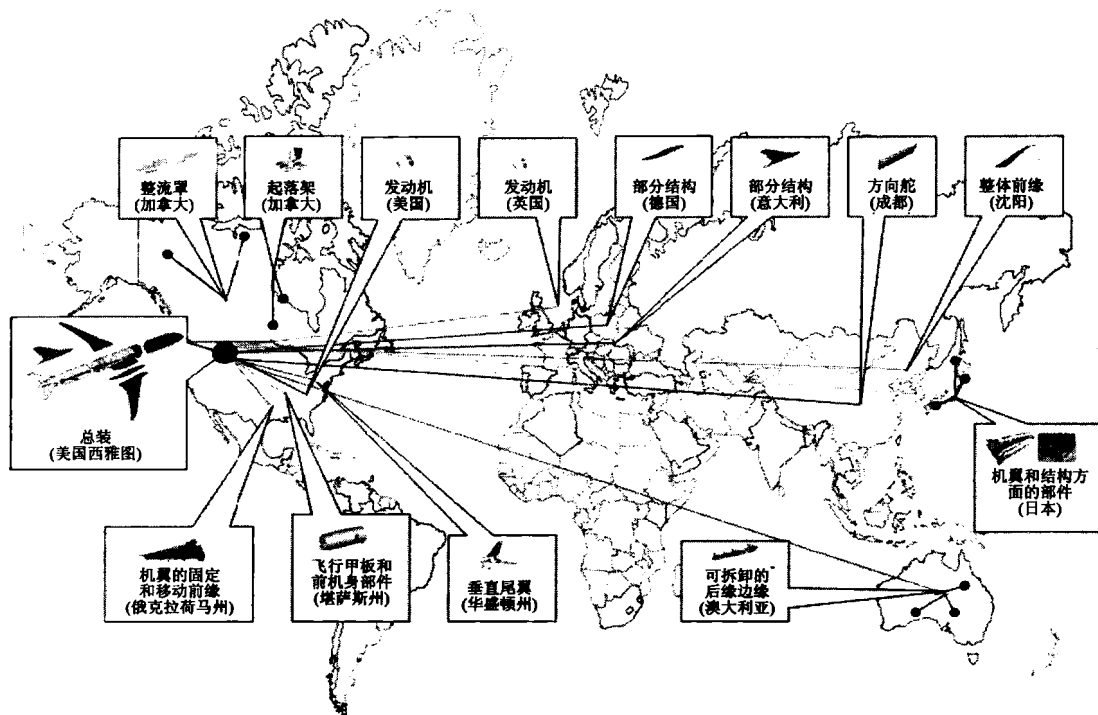


图 1-4 B787 飞机全球化生产示意图

1.3 现代飞行器制造的先进技术及关键技术

除了常用加工技术外,世界各国还投入巨资研究和发展现代飞机制造技术,以满足政治、经济和国防发展的需要。随着航空航天技术的发展,现代飞行器制造的先进技术主要体现在以下几个方面。

1. 数控加工技术和高速加工技术

数控设备是以数控系统为代表的新技术对传统机械制造业渗透而形成的机电一体化产品,已成为现代航空航天制造业的主流制造设备,一般占设备总数的40%以上。数控技术覆盖了机械制造技术、信息处理、加工、传输技术、自动控制技术、伺服驱动技术、传感器技术、软件技术等领域。数控技术的发展趋势是向智能化、网络化、集成化、数字化的方向发展。

制造业不仅需要产品零件的高质量,同时还需要提高生产率、降低生产成本。高速加工技术这一最有发展前途和极具革命性的技术,已成为机加技术发展的主流方向。如采用框中框(Box in Box)结构和对称结构设计的大型龙门五坐标高速铣床,在航空航天制造业中得到了

广泛的应用,已成为航空航天器整体结构件的关键加工设备。由高速加工中心构成的柔性加工单元取代了以往的专用生产线,实现了对航空航天器整体构件的高速高效加工。采用五坐标联动高速加工中心进行整体结构件加工,可实现高速切削和空间曲面控制能力的综合优势。

2. 复合材料及其成形技术

在 20 世纪 90 年代的战斗机上,复合材料的用量已达到机体结构质量的 25%~30%。对于具体部件,复合材料所占结构质量百分比更高。如 EF2000 飞机机体结构质量的 30% 为复合材料,其中机翼中 65% 的材料是碳纤维复合材料,40% 前机身结构为碳纤维复合材料,机翼、前中机身和垂尾蒙皮均由碳纤维复合材料制造,占机体表面的 70%。玻璃纤维雷达罩占 12%,金属只占 15%,其他材料占 3%。欧美在新型军机上的机翼都大量采用了复合材料,如美国的第四代战斗机 F-22、欧洲的“台风”战斗机和空客 A400M 等飞机。图 1-5 所示为空客大型军用运输机 A400M 的复合材料机翼壁板。

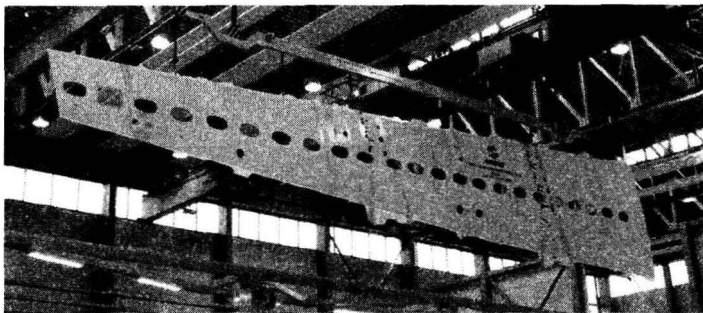


图 1-5 A400M 的复合材料机翼壁板

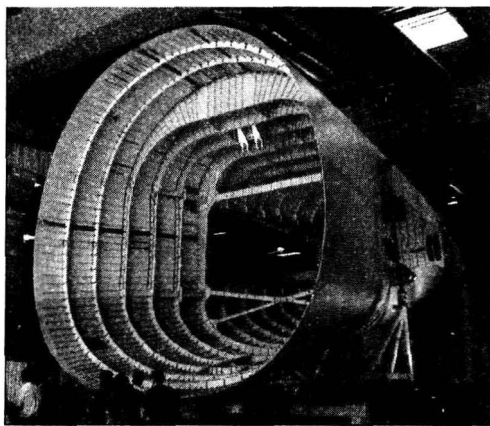


图 1-6 A380 的复合材料机身后段

除了军用飞机上大量使用复合材料外,复合材料在民用飞机上的用量也越来越大,如 A380 的机身后段(如图 1-6 所示),波音 787 飞机的机翼和各机身段等都采用了复合材料及整体成形技术,它们不但可以大幅度减少零件、紧固件和模具的数量,简化工装,减轻结构质量,同时也可以大大降低制造成本。因此,复合材料及其成形技术已成为现代飞机制造中的一项关键技术。

由于复合材料结构制造方法和工艺过程与金属结构件截然不同,构件的性能设计与部件设计需一次完成。因此,大型飞行器