



新兴产业和高新技术现状与前景研究丛书

总主编 金 碚 李京文

飞机制造技术 现状与应用前景

杨 光 编著

FEIJI ZHIZAO JISHU
XIANZHUANG YU YINGYONG QIANJING



SPM

南方出版传媒
广东经济出版社



新兴产业和高新技术现状与前景研究丛书

总主编 金 碚 李京文

飞机制造技术 现状与应用前景

杨 光 编著

FEIJI ZHIZAO JISHU
XIANZHUANG YU YINGYONG QIANJING



SPM

南方出版传媒

广东经济出版社

· 广州 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

飞机制造技术现状与应用前景 / 杨光编著. —广州: 广东经济出版社, 2015. 5

(新兴产业和高新技术现状与前景研究丛书)

ISBN 978 - 7 - 5454 - 3988 - 5

I. ①飞… II. ①杨… III. ①飞机 - 制造 - 生产工艺 - 研究 IV. ①V262

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 089636 号

出版 发行	广东经济出版社 (广州市环市东路水荫路 11 号 11 ~ 12 楼)
经销	全国新华书店
印刷	中山市国彩印刷有限公司 (中山市坦洲镇彩虹路 3 号第一层)
开本	730 毫米 × 1020 毫米 1/16
印张	15.5
字数	261 000 字
版次	2015 年 5 月第 1 版
印次	2015 年 5 月第 1 次
书号	ISBN 978 - 7 - 5454 - 3988 - 5
定价	35.00 元

如发现印装质量问题, 影响阅读, 请与承印厂联系调换。

发行部地址: 广州市环市东路水荫路 11 号 11 楼

电话: (020) 38306055 37601950 邮政编码: 510075

邮购地址: 广州市环市东路水荫路 11 号 11 楼

电话: (020) 37601980 邮政编码: 510075

营销网址: <http://www.gebook.com>

广东经济出版社常年法律顾问: 何剑桥律师

· 版权所有 翻印必究 ·

“新兴产业和高新技术现状与前景研究”丛书编委会

- 总 主 编：**金 碚 中国社会科学院工业经济研究所原所长、
学部委员
- 李京文 北京工业大学经济与管理学院名誉院长、
中国社会科学院学部委员、中国工程院院士
- 副 主 编：**向晓梅 广东省社会科学院产业经济研究所所长、
研究员
- 阎秋生 广东工业大学研究生处处长、教授
- 编 委：**
- 张其仔 中国社会科学院工业经济研究所研究员
- 赵 英 中国社会科学院工业经济研究所工业发展
研究室主任、研究员
- 刘戒骄 中国社会科学院工业经济研究所产业组织
研究室主任、研究员
- 李 钢 中国社会科学院工业经济研究所副研究员
- 朱 彤 中国社会科学院工业经济研究所能源经济
研究室主任、副研究员
- 白 玫 中国社会科学院工业经济研究所副研究员
- 王燕梅 中国社会科学院工业经济研究所副研究员
- 陈晓东 中国社会科学院工业经济研究所副研究员
- 李鹏飞 中国社会科学院工业经济研究所资源与环境
研究室副主任、副研究员

- 原 磊 中国社会科学院工业经济研究所工业运行
研究室主任、副研究员
- 陈 志 中国科学技术发展战略研究院副研究员
- 史岸冰 华中科技大学基础医学院教授
- 吴伟萍 广东省社会科学院产业经济研究所副所长、
研究员
- 燕雨林 广东省社会科学院产业经济研究所研究员
- 张栓虎 广东省社会科学院产业经济研究所副研究员
- 邓江年 广东省社会科学院产业经济研究所副研究员
- 杨 娟 广东省社会科学院产业经济研究所副研究员
- 柴国荣 兰州大学管理学院教授
- 梅 霆 西北工业大学理学院教授
- 刘贵杰 中国海洋大学工程学院机电工程系主任、教授
- 杨 光 北京航空航天大学机械工程及自动化学院
工业设计系副教授
- 迟远英 北京工业大学经济与管理学院教授
- 王 江 北京工业大学经济与管理学院副教授
- 张大坤 天津工业大学计算机科学系教授
- 朱郑州 北京大学软件与微电子学院副教授
- 杨 军 西北民族大学现代教育技术学院副教授
- 赵肃清 广东工业大学轻工化工学院教授
- 袁清珂 广东工业大学机电工程学院副院长、教授
- 黄 金 广东工业大学材料与能源学院副院长、教授
- 莫松平 广东工业大学材料与能源学院副教授
- 王长宏 广东工业大学材料与能源学院副教授

总序

人类数百万年的进化过程，主要依赖于自然条件和自然物质，直到五六千年之前，由人类所创造的物质产品和物质财富都非常有限。即使进入近数千年的“文明史”阶段，由于除了采掘和狩猎之外人类尚缺少创造物质产品和物质财富的手段，后来即使产生了以种植和驯养为主要方式的农业生产活动，但由于缺乏有效的技术手段，人类基本上没有将“无用”物质转变为“有用”物质的能力，而只能向自然界获取天然的对人类“有用”之物来维持低水平的生存。而在缺乏科学技术的条件下，自然界中对于人类“有用”的物质是非常稀少的。因此，据史学家们估算，直到人类进入工业化时代之前，几千年来全球年人均经济增长率最多只有0.05%。只有到了18世纪从英国开始发生的工业革命，人类发展才如同插上了翅膀。此后，全球的人均产出（收入）增长率比工业化之前高10多倍，其中进入工业化进程的国家和地区，经济增长和人均收入增长速度数十倍于工业化之前的数千年。人类今天所拥有的除自然物质之外的物质财富几乎都是在这200多年的时期中创造的。这一时期的最大特点就是：以持续不断的技术创新和技术革命，尤其是数十年至近百年发生一次的“产业革命”的方式推动经济社会的发展。^①新产业和新技术层出不穷，人类发展获得了强大的创造能力。

^① 产业革命也称工业革命，一般认为18世纪中叶（70年代）在英国产生了第一次工业革命，逐步扩散到西欧其他国家，其技术代表是蒸汽机的运用。此后对世界所发生的工业革命的分期有多种观点。一般认为，19世纪中叶在欧美等国发生第二次工业革命，其技术代表是内燃机和电力的广泛运用。第二次世界大战结束后的20世纪50年代，发生了第三次工业革命，其技术代表是核技术、计算机、电子信息技术的广泛运用。21世纪以来，世界正在发生又一次新工业革命（也有人称之为“第三次工业革命”，而将上述第二、第三次工业革命归之为第二次工业革命），其技术代表是新能源和互联网的广泛运用。也有人提出，世界正在发生的新工业革命将以制造业的智能化尤其是机器人和生命科学为代表。

当前,世界又一次处于新兴产业崛起和新技术将发生突破性变革的历史时期,国外称之为“新工业革命”或“第三次工业革命”“第四次工业革命”,而中国称之为“新型工业化”“产业转型升级”或者“发展方式转变”。其基本含义都是:在新的科学发现和技术发明的基础上,一批新兴产业的出现和新技术的广泛运用,根本性地改变着整个社会的面貌,改变着人类的生活方式。正如美国作者彼得·戴曼迪斯和史蒂芬·科特勒所说:“人类正在进入一个急剧的转折期,从现在开始,科学技术将会极大地提高生活在这个星球上的每个男人、女人与儿童的基本生活水平。在一代人的时间里,我们将有能力为普通民众提供各种各样的商品和服务,在过去只能提供给极少数富人享用的那些商品和服务,任何一个需要得到它们、渴望得到它们的人,都将能够享用它们。让每个人都生活在富足当中,这个目标实际上几乎已经触手可及了。”“划时代的技术进步,如计算机系统、网络与传感器、人工智能、机器人技术、生物技术、生物信息学、3D 打印技术、纳米技术、人机对接技术、生物医学工程,使生活于今天的绝大多数人能够体验和享受过去只有富人才有机会拥有的生活。”^①

在世界新产业革命的大背景下,中国也正处于产业发展演化过程中的转折和突变时期。反过来说,必须进行产业转型或“新产业革命”才能适应新的形势和环境,实现绿色化、精致化、高端化、信息化和服务化的产业转型升级任务。这不仅需要大力培育和发展新兴产业,更要实现高新技术在包括传统产业在内的各类产业中的普遍运用。

我们也要清醒地认识到,20 世纪 80 年代以来,中国经济取得了令世界震惊的巨大成就,但是并没有改变仍然属于发展中国家的现实。发展新兴产业和实现产业技术的更大提升并非轻而易举的事情,不可能一蹴而就,而必须拥有长期艰苦努力的决心和意志。中国社会科学院工业经济研究所的一项研究表明:中国工业的主体部分仍处于国际竞争力较弱的水平。这项研究把中国工业制成品按技术含量低、中、高的次序排列,发现国际竞争力大致呈 U 形分布,即两头相对较高,而在统计上分类为“中技术”的行业,例如化工、材料、机械、电子、精密仪器、交通设备等,国际竞争力显著较低,而这类产业恰恰是工业的主体和决定工业技术整体素质的关键基础部门。如果这类产业竞争力不

^① 【美】彼得·戴曼迪斯,史蒂芬·科特勒. 富足:改变人类未来的 4 大力量. 杭州:浙江大学出版社,2014.

强，技术水平较低，那么“低技术”和“高技术”产业就缺乏坚实的基础。即使从发达国家引入高技术产业的某些环节，也是浅层性和“漂浮性”的，难以长久扎根，而且会在技术上长期受制于人。

中国社会科学院工业经济研究所专家的另一项研究还表明：中国工业的大多数行业均没有站上世界产业技术制高点。而且，要达到这样的制高点，中国工业还有很长的路要走。即使是一些国际竞争力较强、性价比较高、市场占有率很大的中国产品，其核心元器件、控制技术、关键材料等均须依赖国外。从总体上看，中国工业品的精致化、尖端化、可靠性、稳定性等技术性能同国际先进水平仍有较大差距。有些工业品在发达国家已属“传统产业”，而对于中国来说还是需要大力发展的“新兴产业”，许多重要产品同先进工业国家还有几十年的技术差距，例如数控机床、高端设备、化工材料、飞机制造、造船等，中国尽管已形成相当大的生产规模，而且时有重大技术进步，但是，离世界的产业技术制高点还有非常大的距离。

产业技术进步不仅仅是科技能力和投入资源的问题，攀登产业技术制高点需要专注、耐心、执着、踏实的工业精神，这样的工业精神不是一朝一夕可以形成的。目前，中国企业普遍缺乏攀登产业技术制高点的耐心和意志，往往是急于“做大”和追求短期利益。许多制造业企业过早走向投资化方向，稍有成就的企业家都转而成为赚快钱的“投资家”，大多进入地产业或将“圈地”作为经营策略，一些企业股票上市后企业家急于兑现股份，无意在实业上长期坚持做到极致。在这样的心态下，中国产业综合素质的提高和形成自主技术创新的能力必然面临很大的障碍。这也正是中国产业综合素质不高的突出表现之一。我们不得不承认，中国大多数地区都还没有形成深厚的现代工业文明的社会文化基础，产业技术的进步缺乏持续的支撑力量和社会环境，中国离发达工业国的标准还有相当大的差距。因此，培育新兴产业、发展先进技术是摆在中国产业界以至整个国家面前的艰巨任务，可以说这是一个世纪性的挑战。如果不能真正夯实实体经济的坚实基础，不能实现新技术的产业化和产业的高技术化，不能让追求技术制高点的实业精神融入产业文化和企业愿景，中国就难以成为真正强大的国家。

实体产业是科技进步的物质实现形式，产业技术和产业组织形态随着科技进步而不断演化。从手工生产，到机械化、自动化，现在正向信息化和智能化方向发展。产业组织形态则在从集中控制、科层分权，向分布式、网络化和去中心化方向发展。产业发展的历史体现为以蒸汽机为标志的第一次工业革命、

以电力和自动化为标志的第二次工业革命，到以计算机和互联网为标志的第三次工业革命，再到以人工智能和生命科学为标志的新工业革命（也有人称之为“第四次工业革命”）的不断演进。产业发展是人类知识进步并成功运用于生产性创造的过程。因此，新兴产业的发展实质上是新的科学发现和技术发明以及新科技知识的学习、传播和广泛普及的过程。了解和学习新兴产业和高新技术的知识，不仅是产业界的事情，而且是整个国家全体人民的事情，因为，新兴产业和新技术正在并将进一步深刻地影响每个人的工作、生活和社会交往。因此，编写和出版一套关于新兴产业和新产业技术的知识性丛书是一件非常有意义的工作。正因为这样，我们的这套丛书被列入了2014年的国家出版工程。

我们希望，这套丛书能够有助于读者了解和关注新兴产业发展和高新产业技术进步的现状和前景。当然，新兴产业是正在成长中的产业，其未来发展的技术路线具有很大的不确定性，关于新兴产业的新技术知识也必然具有不完备性，所以，本套丛书所提供的不可能是成熟的知识体系，而只能是形成中的知识体系，更确切地说是有待进一步检验的知识体系，反映了在新产业和新技术的探索上现阶段所能达到的认识水平。特别是，丛书的作者大多数不是技术专家，而是产业经济的观察者和研究者，他们对于专业技术知识的把握和表述未必严谨和准确。我们希望给读者以一定的启发和激励，无论是“砖”还是“玉”，都可以裨益于广大读者。如果我们所编写的这套丛书能够引起更多年轻人对发展新兴产业和新技术的兴趣，进而立志投身于中国的实业发展和推动产业革命，那更是超出我们期望的幸福事了！

金 碚

2014年10月1日

序 言

早在 20 世纪 80 年代末期, 先进制造技术 (advanced manufacturing technology) 作为一个专有名词就出现了。这是美国根据当时本国制造业面临的机遇与挑战, 重新认识制造业在国民经济中的地位和作用, 而提出的为加强制造业的竞争能力和促进国民经济增长的新概念。“先进制造技术”一经提出, 立即得到世界各国的积极响应, 将制造技术的发展推向了一个新的高潮, 先进制造技术日趋系统化、集成化, 已发展成为集机械、电子、信息、材料和管理技术为一体的新兴交叉学科。

先进制造技术是以优质、高效、低耗、清洁、无污染工艺为基础, 以产品为中心, 以机械制造技术为主体, 以广义制造为手段, 强调了“先进”和“现代”, 具有先进性和时代感。先进制造技术与传统机械制造技术有着本质的区别: 它将机械、电子、信息、材料、能源和管理等方面的技术进行整合, 并应用于产品全生命周期的制造过程中, 即贯穿于从市场需求、产品设计、工艺设计、加工装配、检测、销售、使用、维修, 直至报废处理等所有过程。其目的是实现优质、敏捷、高效、低耗、清洁生产和快速响应市场的需求。

一、国外先进航空制造业发展现状

美国 2012 年提出要重振制造业全球领先的地位, 明确了 11 项应优先发展的技术: 先进传感、测量和过程控制, 先进材料设计、合成和加工, 可视化、信息和数字化制造技术, 可持续制造, 纳米制造, 柔性电子制造, 生物制造和生物信息学, 增材制造, 先进制造和测试设备, 工业机器人, 先进成形与连接

技术。在“制造创新国家网络”计划中,提出并推广3D打印、数字化制造和设计、轻量化材料的制造等。德国工业科学院提出了工业4.0,特别强调把物联网与服务应用到制造领域,能自我预测、自我维护和自我组织学习。在航空业,美国、英国等发达国家的一些著名企业已在产品制造中将网络化、数字化、智能化融合为一体,航空发动机公司已经从过去的制造销售发动机发展到提供服务,即从制造业发展成了现代制造服务行业。

航空先进制造技术对提高航空产品性能、减轻结构重量、延长使用寿命、缩短研制周期、降低成本、提高可靠性起着关键性的作用。因此,近年来飞机制造技术朝着整体结构轻量化、隐身、高可靠性,长寿命、短周期、低成本及绿色先进制造技术方向发展;发动机制造技术朝着整体、更加精密、快速、低成本和抗高温结构制造技术为主的方向发展。

目前,美国波音公司、法国空客公司占据了全球主要飞机市场,与这些企业配套的产业链不仅形成了发达的工业生产体系,而且也形成了先进的制造技术研发体系,这在全球的飞机研制中发挥了重要作用并产生了深远影响。

世界航空先进制造技术主要体现在以下几个方面:

1. 大型化、整体化、轻量化的金属构件制造技术

对于以钛、铝合金为代表的大型整体壁板的成形技术主要有喷丸成形压弯成形。欧美等发达国家广泛采用智能化喷丸技术成形变厚度整体壁板。波音707至777和空客A310至A340等大中型民用客机机翼整体壁板都采用喷丸成形技术制造。

钛合金重要钣金结构件的制造中采用超塑成形/扩散连接技术可以获得良好的减重效益。EF2000机身结构中钛合金构件大多采用超塑成形/扩散连接技术制造,获得了减重30%~50%的技术效益。

采用电子束焊接、扩散焊接、线性摩擦焊接、五坐标数控铣削加工、电解加工法、锻接法等实现发动机整体叶盘制造和整体叶环(无盘转子)制造。在第4代战斗机的动力装置F119和EJ200发动机上,风扇、压气机和涡轮均采用了整体叶盘结构,减重达30%。

2. 数字化制造技术

数字化制造技术包括:产品数字化,设计数字化,试验数字化,制造数字

化, 飞行数字化, 管理数字化。具体内容包括: 定义数字化生产线和数字化车间; 扩大数控机加范围, 增加大件、高效数控加工; 对钣金件、复合材料构件、焊接、检测等采用数字化技术手段和工艺; 减少零部件工装, 发展柔性工装和数字化装配定位技术, 取消原用装配精加工台。数字化制造可以使制造时间缩短 66%, 工装减少 90%, 制造成本降低 50%。

实现数字化制造的里程碑是波音 777, 它是全球第一个无图纸设计制造的全机数字样机。JSF 联合攻击战斗机则是第一个基于全球虚拟企业制造的飞机项目, 它首先开创了数字化生产方式, 代表了数字化制造的最高水平。

3. 高效数控加工技术

台面尺寸大、多龙门、多主轴、高转速和切削效率高的数控机床, 才可以高效完成大型运输机大尺寸、复杂结构的高性能铝合金壁板加工。如波音公司利用三轴五坐标数控自动换刀龙门铣床加工飞机壁板、梁、框、肋等结构件, 并有由 5D 高速加工中心机床构成的柔性加工单元, 用于 757、767、777 飞机窗口隔框、机翼盒、肋条等结构件的加工。

4. 自动化、柔性化的飞机结构装配技术

在大型构件装配中采用数字化装配技术, 可简化型架, 减少工装, 实现自动化柔性装配, 从而提高生产效率和装配质量, 降低制造成本, 缩短制造周期。

精密柔性制孔技术包括机器人制孔系统、自动制孔系统、柔性制孔系统、并联机床柔性钻孔设备、便携式自动制孔系统(无钻孔主轴的柔性导轨小车)等。柔性装配工装单元技术可以缩短工装准备时间, 实现快速制造, 降低制造成本。柔性工装单元就是按工装定位夹紧的功能分解成独立的、重量轻、可移动、可重组的单元体, 多个柔性工装单元可通过软件系统生成柔性装配的生产线。

飞机部件对接柔性装配技术能解决在飞机总装阶段一些与大型机体部件装配测定、定位相关的传统工艺问题。法国图卢兹空中客车公司飞机总装配线单元引入了“测量辅助装配”系统。

飞机壁板的自动装配线已用于空客 A320E4000 机翼壁板柔性装配系统。波音机翼生产线配置了 E5000 (ASAT4) C-17 第 4 代自动化翼梁电磁铆接装配

系统。在框型架的安装过程中,采用数字化激光跟踪定位技术。

5. 高效、低成本先进复合材料制造技术

先进复合材料在飞机上的用量日益增多。空客公司的 A380 客机复合材料用量约 30t,波音 B787 复合材料用量达到 50%,A350 飞机复合材料用量更是达到了 52%。

复合材料应用部位由早先的舱门、整流罩、安定面等次承力结构向现在的机身、机翼等主承力结构发展。飞机上用复合材料制造的复杂曲面制件也越来越多,如 A380 和 B787 飞机上的机身段,球面后压力隔框等,均采用纤维铺放技术和树脂膜渗透(RFI)工艺制造。复合材料制件采用共固化、整体成形技术,能够成形大型整体部件,减少零件、紧固件和模具的数量,减轻重量、有效地降低制造成本。自动铺带和自动丝束铺放保证了复合材料制件的质量稳定性,大大提高了生产效率。

6. 高能束流加工、特种焊接等新技术

对于复杂构件的型腔、型面、型孔、微小孔、细微槽及缝的加工,高能束流加工具有明显优势。激光加工、超声波加工、高压水射流切割等技术都属于这类特种加工技术。激光焊、扩散焊、线性摩擦焊等特种焊接技术在飞机、发动机焊接结构件中的应用越来越广泛。

先进精密毛坯制造技术向近无余量成形方向发展,叶片无余量精密辊轧、多联空心叶片整体铸造、钛合金薄壁大型复杂机匣精铸等都是其代表。

二、我国航空制造业发展现状

我国航空制造业处于发展阶段,在国产民机研制过程中紧跟世界飞机制造发展方向,分析和学习国际先进制造技术,面对新材料、新工艺带来的挑战在关键技术上有所突破。这些关键技术覆盖了机翼厚壁板复杂结构金属喷丸成形技术、环保表面处理技术、铝锂合金加工技术、主承力结构件的复合材料制造技术、复合材料无损检测及修补技术、数字化工艺技术、自动化装配技术等技术领域,从整体上带动了我国飞机制造产业的技术提升。

国产航空先进制造技术主要体现在:

1. 铝锂合金制造技术

铝锂合金是我国 C919 大型客机中选材中的显著特色之一，并在机身结构中首次使用。铝锂合金机身结构制造工艺涉及钣金、热处理、机加、连接及表面防护技术。

通过新型铝锂合金制造技术的研究，完成了新型铝锂合金制造工艺体系，突破了铝锂合金制造关键技术，解决了新型铝锂合金表面处理问题，实现了新型铝锂合金机身蒙皮结构件的高效、精准成形，形成系列工艺规范。

2. 复合材料制造技术

C919 大型客机中复合材料用量占机体总重量的 15%，其中大部分为加筋壁板结构。大尺寸的平尾、垂尾、后机身均为加筋壁板共固化结构制件。在平尾壁板制造中，通过子母真空袋封装技术，以及模具设计制造技术，实现了平尾复合材料整体壁板的共固化成形。

在自动铺带工艺中突破复杂曲面铺贴工艺技术，掌握对产品性能影响的控制技术，高效高质实现民用飞机大尺寸结构件的自动铺带。

3. 自动化装配工艺技术

C919 飞机装配技术是以建立与未来批量生产模式相适应的飞机自动化装配生产线为目标。为此构建了面向三维数字化工艺设计和应用的一体化集成系统，可以进行数字化设计与仿真以及分析、评估。

全面采用柔性化、自动化精密钻铆装配技术，推广自动钻铆工艺、复合材料装配工艺、干涉铆接工艺等技术。全机对接生产线采用自动定位对接系统，将传统的依靠手工或专用型架夹具的装配方式转变为数字化的自动对接装配方式，有效提升了装配精度和效率。

4. 数字化装配生产线技术

根据 C919 批生产的需求，设计了中机身、中央翼、平尾、全机对接以及系统总装移动生产线等 5 条生产线。生产线充分考虑柔性、兼容及可扩展性，可适应 C919 不同机型的装配、对接需求。在生产线上引入了机身壁板自动钻铆设备、虚拟五轴自动制孔设备、壁板类自动装配设备、机身/翼身自动对接设备等，可以对部件进行装配/对接自动化测量、定位及数字化制造协调和检

测等，实现对飞机生产线设计的突破。

5. 增材制造技术

增材制造技术是全球先进制造领域兴起的一项集光、机、电、计算机、数控及新材料于一体的先进制造技术，激光成形、3D 打印都属于这类技术。

采用激光成形制造技术，成功为国产 C919、J15、J20、J31 飞机提供大型复杂整体钛合金结构件。

航空先进制造技术不是单一的一门科学技术，它是集成了多学科的、综合程度较高的新兴技术，理论完善和技术进步都需要一个相当长的时间。我们在自主研发的同时，需要不断分析、学习、并借鉴国外的先进技术，这样才可以加快提高我国航空制造技术和生产管理的水平。

目 录

第一章 大型航空结构件数字加工/成形技术	001
一、技术发展、当前趋势	001
二、大型结构件加工面临的难题及对策	004
三、钣金成形技术	009
四、大型锻件技术	023
五、大型金属合金铸件技术	029
六、用于大型结构件制造的新连接技术	038
七、数控高效加工技术	048
八、3D 打印在大型结构件的应用	051
九、大型结构件数字加工/成形技术发展方向	058
第二章 先进连接和装配技术	062
一、先进连接和装配技术发展现状	062
二、焊接技术	073
三、胶接技术	083
四、全自动装配技术	086
第三章 先进复合材料制造技术	095
一、先进复合材料在飞机制造中的应用	095
二、复合材料的成形技术	106
三、复合材料零件的加工和连接	145
第四章 数字化设计/制造技术	165
一、数字化设计/制造技术背景	165
二、产品数字化	166

三、设计数字化	173
四、实验数字化	184
五、制造数字化	188
六、飞行数字化	192
七、管理数字化	193
第五章 超精密加工及微系统制造技术	199
一、超精密加工技术背景和现状简介	199
二、超精密机床	201
三、超精密加工的关键技术	203
四、应用范例	207
五、超精密领域发展趋势	209
六、微系统制造技术	211
参考文献	221
结束语	230