

“十二五”国家重点图书出版规划项目

AVIATION MANUFACTURING ENGINEERING HANDBOOK

航空制造工程手册

(第2版)

发动机机械加工

《航空制造工程手册》总编委会 主编

航空工业出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

航空制造工程手册

(第2版)

发动机机械加工

《航空制造工程手册》总编委会 主编

航空工业出版社

北京

内 容 提 要

本分册作为一部工具书,对航空发动机机械加工的基本原理、工艺方法和工艺参数等进行了较为详细的阐述和介绍。本分册共计5篇26章,其内容包括:航空发动机机械加工工艺技术基础(含机械加工工艺基础、工艺过程设计),机械加工设备与工艺设备(含加工设备、专用夹具和刀具,测量仪等),航空发动机数字化制造(含数字化制造技术、产品数据的数字化表达和加工仿真技术、叶片类零件自适应加工技术),发动机机械加工零件的表面完整性(含表面完整性及其控制的指导原则),发动机典型零件的机械加工(含盘类件、轴类件、机匣和环形件、整体叶盘和叶轮、喷嘴和燃烧室)以及直升机传动机构典型零件加工等。

本分册对军、民用航空发动机生产、科研、教学都有实用价值,可供从事航空发动机机械加工、产品设计的工程技术人员使用或参考,也可供机械加工专业的工程技术人员、技术工人以及大专院校的师生参考和学习。

图书在版编目(CIP)数据

航空制造工程手册. 发动机机械加工/《航空制造工程手册》总编委会主编. --2版. --北京:航空工业出版社,2016.6

ISBN 978-7-5165-1040-7

I. ①航… II. ①航… III. ①航空工程-制造-手册
②航空发动机-金属切削-手册 IV. ①V26-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第157667号

航空制造工程手册·发动机机械加工(第2版)

Hangkong Zhizao Gongcheng Shouce · Fadongji Jixie Jiagong (Di 2 Ban)

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

三河市华骏印务包装有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2016年8月第2版

2016年8月第1次印刷

开本:787×1092 1/16

印张:88.75

字数:2216千字

印数:1—2000

定价:355.00元

再版说明

我国航空工业要加速发展,跨入世界先进行列,并在全球市场竞争中赢得有效的市场份额,需要根据市场需求快速更新、快速生产出优质优价、可靠长寿的产品,这需要有先进的航空制造工程系统作为赢得市场竞争的技术基础和保障。发达国家始终以优先发展航空制造工程,提高航空工业基础能力和创新能力作为确保市场竞争优势的既定方针。没有先进的制造工程系统,难以形成核心竞争力,航空制造工程系统已成为市场竞争的重要基础和技术支撑。

1993~1998年出版的、基本覆盖航空制造工程各专业学科、由32个分册组成的《航空制造工程手册》汇集了航空工业40年来所取得的成果,对“九五”、“十五”以及“十一五”期间强化基础、提高能力,加速制造技术和航空工业的发展起到了积极的推动作用。但对于目前世界航空工业高速发展的新形势,新技术、新设备、新材料、新工艺的不断涌现,尤其是我们面临着更繁重的高新工程和新型号研制任务,要使得我国航空工业的生产能力得到长足的发展,有必要对“十一五”以来的航空制造技术进行全面的梳理和总结。

鉴于此,2007年起,在全行业对《航空制造工程手册》各分册相关技术发展、航空新产品对相应制造技术的需求等进行了全方位的调研工作,筛选出急需的分册修订,并视情对各分册分期、分批进行修订工作,以满足“十二五”以及未来航空工业对先进制造技术的需求。

《航空制造工程手册》第2版的修订工作采用以原各分册参编单位为主,同时根据目前航空工业的各类产品的分工,补充擅长该类制造技术的企事业单位作为参编单位。集全行业之力,根据各制造技术的急需程度,组织航空工业全行业的制造工程技术方面的专家,分期、分批逐步完成《航空制造工程手册》第2版的再版工作。

对于《航空制造工程手册》第2版各分册的编写体例,基本保持第1版风

格,具体内容的修订仍坚持求实、求新、求精、求是的基本原则。对于目前制造技术仍然适用的技术内容予以保留;对于已过时或会逐渐淘汰的技术予以删除;对于已基本成熟的新技术给出可实际操作技术数据、工艺;对于有借鉴作用的先进制造技术予以前瞻性描述。并对原版中的疏漏、图表的清晰度进行了修正。

目前,航空工业任务繁重,《航空制造工程手册》第2版的出版必将为航空工业的加速发展给予有力的技术支撑。

《航空制造工程手册》第2版总编委会

2010年11月

前 言

《航空制造工程手册·发动机机械加工》于1997年12月出版,对军、民用航空发动机生产、科研、教学都起到了极为重要的作用。但近年来,随着新结构、新技术、新工艺、新材料和新设备的发展变化,许多先进的机械加工技术应运而生,《航空制造工程手册·发动机机械加工》内容已不能全面适应迅速发展的航空发动机机械加工需求,对该手册内容修订再版是非常必要的。

航空发动机制造是一个国家制造业的典型代表,它集设计、材料、工艺、加工、检测、过程控制等领域的高、精、尖技术为一体,具有结构形状复杂、零件种类多、制造精度高等特点。近二十年来,我国航空发动机行业实现了产品的更新换代和产业升级,为了满足航空发动机性能的进一步提高的需求,在压气机、涡轮、燃烧室、尾喷口等零部件设计上都大量采用了一些新材料、新结构,同时也对航空发动机制造技术提出了更高的要求。首先体现在制造工艺、方法与装备技术上沿着提高加工效率、提高加工精度、适应产品品种变化和降低生产成本等方向更深入地发展,其次是在信息技术的基础上掌握制造工艺、材料和加工设备之间的相互作用,实现数字化制造技术的集成应用。这二十年里航空发动机机械加工技术最大的变化无疑是数字化加工技术的发展,整个行业的数控机床数量呈几何级数增长。开始引入各种先进的数字化加工技术,包括加工过程模拟仿真、三维建模、快速编程、全过程无干预加工等。

近二十年来航空发动机结构设计和制造的新特点包括:①设计结构复杂化、轻量化;为实现减重增效,航空发动机零部件大都采用复杂曲面和高结构效率的整体、轻量化结构,这对制造工艺以及制造设备提出了更高的要求。②从普通合金到新型耐高温、轻质高强合金的应用;近年来发动机零件大量采用钛合金、镍基或钴基高温合金、粉末高温合金、单晶合金、金属间化合物等难切削材料,切削过程中表现出很高的动态切变强度,给加工带来了很大的困难。③从金属材料到大量非金属材料的应用;开始大量采用非金属材料替代金属材料,最典型的就是在发动机外壳和低温部件使用各种复合材料。④设计高精度化;随着发动机性能提升,以及可靠性和寿命的要求,其零部件的设计精度同时提高,

对加工精度的要求也越来越高。⑤从机械加工到特种加工的转变；各种特种加工技术解决了常规加工中的难题，例如精密电解、电火花成形、激光加工等，已广泛应用于航空发动机结构件的制造中，可以显著提高效率，降低成本，在很大程度上可以替代机械加工。⑥从减材制造到精密成形和增材制造；先进精密毛坯制造技术正在向精成形方向发展，快速原型技术已经发展到能够直接快速成形零件，可减少价格昂贵的原材料消耗并节省大量机械加工，同时提高零件的机械性能。⑦从保证几何形态为主到表面完整性控制为主；新一代航空发动机的长寿命需求对零件表面状态提出更高的要求，加工过程不仅要控制几何尺寸，还要以疲劳性能指标为主要判断依据，通过控制产品表面完整性提高疲劳强度。⑧从试验为主到仿真与试验结合到仿真优化为主；在航空发动机制造技术的发展过程中，NC技术、CAD/CAM与FMS技术在提高产品质量、缩短研制周期、提高产品的应变能力、降低成本等方面效果显著。整个制造过程可以在软件中进行模拟，预测结果，显著减少研制过程的试验迭代次数。⑨材料性能和几何尺寸的长期稳定；先进航空发动机需求易维护性和长寿命，零件的材料性能和几何尺寸必须保持长期稳定，制造过程需要控制内部残余应力，减小变形。⑩全生命周期的低成本制造；航空发动机作为一种工业产品必然要求控制制造成本，减少材料消耗。提高加工效率、合格率的技术种类非常广泛，往往需要多专业结合。⑪自动化生产；近年来，由于数字控制技术的普及，传统的通用设备被数控设备所代替，大大提高了加工自动化程度。发动机行业逐渐开始以信息技术为中心布置生产线，利用以过程控制技术为核心的制造技术实现高效率的自动化生产。

从航空发动机设计及制造的发展趋势能够看到其机械加工比例在逐渐减少，但技术在向数字化、智能化、高精度、高可靠性、低成本的方向转变。未来航空发动机机械加工技术的主要发展方向是：单晶合金、粉末合金、增强型高温合金等各种轻质高强材料的加工技术；复合材料、陶瓷类材料、石墨等非金属材料的加工技术；整体叶盘、组合盘轴、大型精铸件等复杂结构零件的加工技术；精密超精密加工技术；保证表面完整性的抗疲劳制造技术；几何尺寸稳定性控制技术；数字化制造和模拟仿真技术；高速切削、宽行加工等低成本制造技术。

本次再版修订的原则是：总结我国航空发动机机械加工近二十年来的科研与应用成果、先进经验，吸收先进技术，综合归纳，汲取精华；顺应航空发动机设计及制造发展趋势，补充完善原手册内容，去除陈旧和过时的内容，增加新工艺、新材料、新设备的应用，增加数字化加工内容，并将涉及发动机修理的技术融入其中，重点体现了上述机械加工技术的主要发展方向。手册中的范例以先进的涡扇发动机为主，兼顾典型的涡轴、涡桨、涡喷发动机结构，充分体现该手册的先进性、科学性、可靠性、实用性，推动航空发动机机械加工技术的进步和持续发展。

《航空制造工程手册·发动机机械加工》第2版与第1版相比,篇次由第1版的4篇增至5篇,章节数由23章增至26章;对第1版章节进行了调整、删减、合并,对内容进行了增补充实和修订完善,对有些不适宜的内容进行了适当删减。如新增技术管理、航空发动机数字化制造、机械加工零件的表面完整性、鼓筒加工、叶片的加工、整体叶盘、叶轮的加工、控制系统典型零件的加工、直升机传动机构典型零件的加工等内容。删除第1版中紧固件的加工、钣金冲压加工技术基础、主要冲压工艺方法、导管加工工艺等章节。将第1版中“环形机匣的加工”与“环形件的加工”章节内容合并为“机匣和环形件加工”。将第1版中“燃烧室机匣零件的加工”“火焰筒零件的加工”“进气整流罩及加力稳定零件的加工”“燃烧室火焰筒(板焊)组件的加工”“加力燃烧室可调节尾喷口的加工”等章节进行了删减与合并,新编为“主燃烧室的加工”和“加力燃烧室的加工”,并增加修理及技术展望等内容。

《航空制造工程手册·发动机机械加工》的修订工作得到了中国航空工业集团公司、主编单位和各参编单位各级领导的大力支持,参加本手册再版修订的单位有:中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司(简称中航工业黎明)、中航工业西安航空发动机(集团)有限责任公司(简称中航工业西航)、中航工业东安发动机(集团)有限责任公司(简称中航工业东安)、中航工业南方航空工业(集团)有限责任公司(简称中航工业南方)、中航工业贵州红林机械有限责任公司(简称中航工业红林)、西北工业大学(简称西工大)、南京航空航天大学(简称南航)、沈阳航空航天大学(简称沈航),其中,第1章、第2章内容由沈航编写完成,第3章、第4章、第5章、第6章、第15章、第16章、第20章、第24章、第26章由中航工业黎明编写完成,第7章、第8章、第9章由南航编写完成,第10章、第11章、第12章由西工大编写完成,第13章、第14章、第21章、第25章由中航工业西航编写完成,第17章、第23章由中航工业东安编写完成,第18章由中航工业黎明与中航工业西航共同编写完成,第19章由中航工业黎明与中航工业南方共同编写完成,第22章由中航工业红林编写完成。参编人员积极认真地编写稿件,付出了许多心血和汗水,各单位的相关技术人员提供了宝贵的技术资料和素材,编写人员付出了大量的劳动,正是在所有参与者的辛勤努力和辛苦付出下,本手册才能顺利如期出版,在此一并表示衷心的感谢。

本次参与《航空制造工程手册·发动机机械加工》再版修订的单位和人员较多,编者水平有限,加之编写时间较紧,错误、不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

《航空制造工程手册·发动机机械加工》第2版分编委会

2015年10月

《发动机机械加工》分编委会组成名单

主 编 王少刚

副主编 (按姓氏笔划排列)

牛昌安 石竖鲲 回 丽 刘 锐 刘青海

杨润石 陈贵林 赵 艳 徐九华 常智勇

编 委 (按姓氏笔划排列)

王 俊 吕光磊 刘 可 孙惠斌 李 文

李 亮 张建中 庞丽君 胡良毅 柳万珠

莫 蓉 奚军生 唐秀梅 黄学怀 傅玉灿

《发动机机械加工》其他编写和统稿人员名单

编写人员 (按姓氏笔划排列)

王聪梅 吕 泉 任军学 刘丽娟 刘晓哲

刘维伟 杜宝玉 李文广 李晓光 李新效

李冀霞 杨 踊 杨长勇 杨能阁 吴宝海

沈志云 张 莹 张 娟 张定华 陈 雷

金秀杰 庞继有 单纯利 赵 威 胡晓群

姚倡锋 龚环球 彭会文 童宏伟 董 超

统稿人员 (按姓氏笔划排列)

王兴超 何 岚 秦秀秀

序

我国航空工业已走过了四十余年的历程，从飞机的修理、仿制到自行研制，航空制造工程得到很大的发展。在航空高科技产业的大系统中，航空制造工程是重要的组成部分之一。航空工业，就其行业性来讲，属于制造业范畴。航空制造工程的技术状况，是衡量一个国家科学技术发展综合水平的重要标志。航空制造工程的发展水平，对飞机的可靠性和使用寿命的提高、综合技术性能的改善、研制和生产成本的降低、甚至总体设计思想能否得到具体实现等均起着决定性作用。

航空制造工程已成为市场竞争的重要基础，要发展航空工业、并有效地占领市场，不仅要不断地更新设计，开发新产品，更重要的是要具备一个现代化的航空制造工程系统。在发达国家中，均优先发展航空制造工程，很多新工艺、新材料、新设备、新技术都是在航空制造工程中领先使用的，因此必须从战略高度予以重视，并采取实际而有效的措施加速它的发展。编写《航空制造工程手册》，就是为实现航空制造工程现代化的战略目标，在制造工程领域进行的基础性工作。

四十年来，我国航空工业积累了大量经验，取得了丰硕的成果，特别是改革开放以来，开阔了视野并有可能汲取更多的新科技信息。但是如何将这些容量浩繁、层次复杂、学科众多的科学技术和经验汇集起来，使之成为我国航空工业、乃至国家的珍贵财富，是一项具有重大实用价值和长远意义的任务，为此航空航天部决定组织全行业的力量，统一计划、统一部署完成这项极其复杂的规模巨大的系统工程。大家本着继往开来的历史责任感和紧迫感，从1989年开始组织航空工业全行业制造工程方面造诣至深的专家、教授、学者，经过几年的努力陆续编写出版了这套基本覆盖航空制造工程各专业各学科的包括三十二个分册、几千万字的《航空制造工程手册》。

编好这套手册是一项十分艰巨的工作。大家始终坚持求实、求新、求精、求是的原则，在确保鲜明航空特色的前提下，在总体内容上强调实用性、综合性、成套性；在表达形式上，以技术数据、图形表格、曲线公式为主；阐述扼要，结论严谨，力求使手册成为一部概念准确、数据可靠、文字简洁、编排合理、查阅方便，能为广大从事航空制造工程的科技人员提供有益指导和参考的工具书。

首次组织编纂大型手册,缺乏经验,还由于过去资料积累基础比较薄弱,新技术发展迅速和深度广度不断增加,使这项工作带有相当程度的探索性,因之错误与不足之处实为难免,恳切希望广大读者给予指正。对在这套手册编写过程中给予支持的单位和付出辛勤劳动,提供资料,参与编写,评审,出版的同志们表示衷心感谢。由于我国航空制造工程与世界水平尚存在较大差距,这套手册出版之后,还有不断求新、完善的必要,《航空制造工程手册》总编委会及其办公室是常设机构,将努力收集新的科技信息及这套工具书使用的情况和意见,为今后的修订提供依据,以求进一步完善和提高。

何文治

1992年8月28日

《航空制造工程手册》 总编委会、顾问及办公室组成名单

主 任 何文治

副 主 任 (按姓氏笔画排列)

马业广	王云机	王敬堂	方裕成	刘多朴	朱伯贤
任家耕	李成功	李哲浩	李章由	吴复兴	易志斌
郑作棣	杨彭基	张 彤	张士元	张钟林	周家骐
周砥中	周晓青	金德琨	姚克佩	顾元杰	徐秉铨
徐培麟	郭景山	程宝渠	屠德彰		

常务副主任 马业广

顾 问 (按姓氏笔画排列)

马世英	于 欣	于志耕	于剑辉	王英儒	冯 旭
杨 墉	杨光中	陆颂善	枉云汉	罗时大	荣 科
邴少安	董德馨	程华明	廖宗懋	颜鸣皋	戴世然

委 员 (按姓氏笔画排列)

马业广	王广生	王云机	王国成	王喜力	王敬堂
方学龄	方裕成	刘多朴	刘树桓	刘盛东	刘瑞新
关 桥	朱伯贤	孙国壁	任家耕	严世能	何文治
何恽晋	李成功	李秋娥	李哲浩	李章由	李德澄
杜昌年	沈昌治	陈于乐	陈 进	陈积懋	陈德厚
余承业	杨彭基	吴志恩	吴复兴	张 彤	张 夏
张士元	张幼楨	张灵雨	张纯正	张钟林	张增模
周家骐	周砥中	周晓青	易志斌	郑作棣	林更元

林泽宽	林敦仪	金慧根	金德琨	国 岩	赵仲英
胡四新	胡建国	姜淑芳	姚永义	姚克佩	郝命麒
顾元杰	郭景山	晏海瑞	唐荣锡	唐瑞润	徐秉铨
徐培麟	常荣福	戚道伟	崔连信	屠德彰	程宝渠
熊敦礼	戴 鼎				

常 委 (按姓氏笔画排列)

马业广	王云机	何恽晋	李成功	李哲浩	吴复兴
郑作棣	周家骐	戚道伟	崔连信	屠德彰	戴 鼎

办公室主任 戚道伟

办公室副主任 (按姓氏笔画排列)

刘树桓 姜淑芳 崔连信

办公室成员 (按姓氏笔画排列)

丁立铭	王偌鹏	刘树桓	刘瑞麟	邵 箭	陈 刚
陈振荣	宋占意	张士霖	林 森	段文斌	贺开运
姜淑芳	莫龙生	徐晓风	戚道伟	崔正山	崔连信

《发动机机械加工》分编委会组成名单

主 编 徐秉铨

副主编 (按姓氏笔划排列)

刘 湘 吴久诚 陈 进 芦丹忱 宋宝玉
柯明扬

编 委 (按姓氏笔划排列)

王丽萍	邓修瑾	司克鑫	艾银生	刘 湘
李宝岐	庄铁肩	吴久诚	宋宝玉	吴诗惇
芦丹忱	陈兆民	陈 进	陈书云	杨万民
杨祥春	金宝钝	周丽珠	武荣天	姚发起
柯明扬	胡金根	张新成	徐秉铨	徐焕荣
曹志谷	曹祖安	崔铁林	顾芳润	顾惠连
赵冬梅	樊宪林	臧傅礼		

《发动机机械加工》其他编写和统稿人员名单

编写人员 (按姓氏笔划排列)

于丕业	王志军	毛金海	史重英	冯桂红
宋 军	汪贞千	陈适先	陈树炎	任玺圭
张鹏云	杨鹤林	郑立贤	高惠清	阎 华
董茂松	焦英奎			

统稿人员 (按姓氏笔划排列)

宋宝玉 杨祥春 顾芳润

目 录

第1篇 航空发动机机械加工技术基础

第1章 机械加工工艺基础 3

- 1.1 发动机机械加工工艺
技术准备 3
 - 1.1.1 工艺技术准备工作原则与依据 ... 3
 - 1.1.2 工艺技术准备的工作内容 3
 - 1.1.3 设计工艺性 4
- 1.2 机械加工工艺过程质量控制 8
 - 1.2.1 零件制造质量 8
 - 1.2.2 工艺过程设计的质量控制 9
 - 1.2.3 机械加工过程的质量控制 26
- 1.3 提高劳动生产率 27
 - 1.3.1 时间定额 27
 - 1.3.2 提高生产率的工艺措施 28
 - 1.3.3 提高生产率的组织措施 28
 - 1.3.4 采用高效及自动化加工,
提高生产率 28
- 1.4 工艺技术、质量管理 29
 - 1.4.1 技术经济分析 29
 - 1.4.2 正交设计法 30
 - 1.4.3 加工质量工艺控制技术 33
- 1.5 计算机技术的应用 48
 - 1.5.1 计算机辅助机床控制 48
 - 1.5.2 计算机辅助制造系统 49
 - 1.5.3 成组技术 49
 - 1.5.4 计算机辅助工艺过程设计 51

第2章 机械加工工艺过程设计 53

- 2.1 机械加工工艺过程 53
 - 2.1.1 机械加工工艺过程的组成 53
 - 2.1.2 工艺过程的设计 55
 - 2.1.3 编制工艺文件 56
 - 2.1.4 航空发动机零件机械加工的
工艺措施 58
- 2.2 设计工艺过程的基本要求及
技术依据 58

- 2.2.1 设计工艺过程的基本要求 58
- 2.2.2 设计工艺过程的技术依据 59
- 2.3 工艺路线设计 61
 - 2.3.1 零件设计图样工艺分析 61
 - 2.3.2 零件毛坯 62
 - 2.3.3 加工方法选择 64
 - 2.3.4 阶段划分 67
 - 2.3.5 工序的集中与分散 68
 - 2.3.6 基准选择 68
 - 2.3.7 热处理工序的安排 74
 - 2.3.8 辅助工序的安排 76
- 2.4 工序设计 79
 - 2.4.1 机床及工艺装备的选择 79
 - 2.4.2 尺寸链 79
 - 2.4.3 加工余量及其确定 83
 - 2.4.4 工序尺寸的确定 103
 - 2.4.5 工艺尺寸换算类型及其换算 ... 111
 - 2.4.6 尺寸图表法 113
- 附录 A 工艺图表形式 125
- 附录 B 发动机主要零件的材料 ... 137
- 附录 C 攻丝前钻孔用麻花钻直径
(摘自 JB/Z228—1985) ... 138

第2篇 机械加工设备与工艺装备

第3章 加工设备 145

- 3.1 机械加工设备的选择 145
 - 3.1.1 设备选择的原则 145
 - 3.1.2 设备选择的依据 145
- 3.2 国产机床通用型号 146
 - 3.2.1 型号的表示方法 146
 - 3.2.2 机床的分类及代号 146
 - 3.2.3 通用特性代号、结构特性
代号 147
 - 3.2.4 机床的组、系代号 147
 - 3.2.5 机床的主参数 147

3.2.6 通用机床型号示例	150	4.6.2 半自动化夹具	191
3.3 国产专用机床的型号	150	4.6.3 对自动化夹具的基本要求	192
3.4 发动机零件机械加工典型 机床示例	151	4.7 数控机床夹具	192
3.4.1 车床示例	151	4.7.1 数控钻床夹具的坐标系示例	192
3.4.2 加工中心示例	152	4.7.2 数控机床夹具的特点	193
3.4.3 钻镗床示例	154	4.8 专用夹具的设计	194
3.4.5 磨床示例	155	4.8.1 专用夹具的基本要求	194
3.4.6 拉床、插床示例	157	4.8.2 专用夹具的设计工作特点	194
3.4.7 滚齿机示例	159	4.8.3 专用夹具的设计步骤	194
3.4.8 复合加工机床示例	159	4.9 组合夹具	195
3.4.9 钣金成形设备	161	4.9.1 组合夹具的应用	195
3.4.10 其他加工机床示例	161	4.9.2 组合夹具的使用原理	196
第4章 专用夹具	163	4.9.3 组合夹具元件的分类及主要 规格	196
4.1 夹具的基本概念	163	4.9.4 组合夹具的精度	198
4.1.1 夹具的定义	163	4.10 夹具工作精度的分析与 估算	199
4.1.2 机床夹具及其分类	163	4.10.1 零件加工时的误差与 不等式	199
4.1.3 专用夹具组成及其元件	166	4.10.2 系统误差分析	200
4.1.4 专用夹具的作用及其基本 要求	169	4.10.3 减小各项误差的措施	203
4.2 夹具的选择	169	4.10.4 误差分析示例	203
4.2.1 使用夹具的合理工艺方案	170	4.11 发动机零件机械加工典型 专用夹具	204
4.2.2 确定专用工艺装备总数的原则 与依据	170	4.11.1 盘类零件加工专用夹具	204
4.2.3 专用夹具的选择原则	171	4.11.2 轴类零件加工专用夹具	205
4.2.4 使用夹具的经济性分析	171	4.11.3 机匣类零件加工专用夹具	206
4.3 工件的定位	172	4.11.4 壳体类零件加工专用夹具	207
4.3.1 工件定位的基本原理	172	4.11.5 环形件类零件加工专用 夹具	207
4.3.2 定位方式所能限制的自由度	176	4.11.6 中小构件加工专用夹具	207
4.3.3 工件在夹具中定位形式	177	4.11.7 焊接结构零件专用夹具	209
4.3.4 定位方案的确定准则	180	第5章 专用刀具	211
4.4 工件的夹紧	181	5.1 专用刀具的基本概念	211
4.4.1 夹紧装置的组成及夹紧方案的 选择原则	181	5.1.1 发动机零件切削加工中专用刀具 的重要性	211
4.4.2 夹紧装置基本要求及其分类	183	5.1.2 专用刀具选用原则和技术 要求	211
4.5 夹具的辅助机构	187	5.2 各类刀具材料的使用性能 与选用	212
4.5.1 夹具与机床连接形式	187		
4.5.2 辅助支撑装置	188		
4.6 自动化夹具	191		
4.6.1 自动化夹具的组成	191		

5.2.1 刀具材料应具备的性能	212	6.5.3 干涉法用量仪	281
5.2.2 刀具材料的物理、力学性能及 切削用量选用	213	6.5.4 针描法（触针法）用量仪	281
5.2.3 刀具材料种类和选用	217	6.5.5 印模法	282
5.2.4 部分切削工艺切削用量 推荐值	219	6.6 螺纹测量仪器	282
5.3 发动机零件切削加工中常用的 专用刀具	233	6.6.1 螺纹参数综合测量仪器	282
5.3.1 刀具几何角度的选择	233	6.6.2 螺纹参数单项测量仪器	284
5.3.2 车刀	235	6.7 齿轮测量仪器	284
5.3.3 孔加工刀具	238	6.7.1 齿轮参数单项测量仪器	284
5.3.4 铣削加工刀具	242	6.7.2 齿轮参数综合及整体测量 仪器	286
5.3.5 镗刀	242	6.8 发动机叶片型面测量仪器	286
5.3.6 拉削工具	247	6.8.1 叶片专用测具	287
5.4 未来航空发动机零件专用 刀具	247	6.8.2 叶片电感测量仪	288
第6章 测量仪器	250	6.8.3 三坐标测量机	289
6.1 机械加工过程测量技术 基础	250	6.8.4 四坐标激（白）光测量机	289
6.1.1 概述	250	6.8.5 光学扫描测量仪	290
6.1.2 长度计量单位	251	6.8.6 叶片型面测量方法及准确度 比较	290
6.1.3 测量方法与测量原则	251	6.9 先进长度测量仪器	292
6.1.4 测量误差及数据处理	252	6.9.1 坐标测量机	292
6.1.5 测量仪器基本度量指标	255	6.9.2 非接触测量仪器	295
6.2 测量仪器的选择	256	6.9.3 接触与非接触复合测量 仪器	298
6.2.1 测量仪器选择原则	256	第3篇 航空发动机数字化制造	
6.2.2 测量仪器选择方法	256	第7章 航空发动机数字化制造	
6.3 线性一维尺寸测量仪器	259	概述	303
6.3.1 长度尺寸测量仪器	259	7.1 航空发动机数字化制造的内涵 及特点	303
6.3.2 深度尺寸测量仪器	270	7.1.1 航空发动机数字化制造的 内涵	304
6.3.3 宽度尺寸测量仪器	273	7.1.2 航空发动机数字化制造的 特点	305
6.3.4 壁厚测量仪器	274	7.2 航空发动机数字化制造系统 的组成	308
6.4 形位公差测量仪器	276	7.3 航空发动机数字化制造系统的 应用环境	310
6.4.1 形位公差检测原则	276	7.4 航空发动机数字化制造技术的 应用现状及展望	316
6.4.2 形状公差测量仪器	278		
6.4.3 位置公差测量仪器	278		
6.4.4 形状和位置公差测量仪器	279		
6.5 表面粗糙度测量仪器	280		
6.5.1 比较法用比较样块	280		
6.5.2 光切法用量仪	281		