

哈尔滨理工大学
制造科学与技术系列专著



航空航天典型零件加工 系列刀具设计应用

程耀楠 著



科学出版社

哈尔滨理工大学制造科学与技术系列专著

航空航天典型零件加工系列刀具 设计应用

程耀楠 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书结合理论分析和实验研究,在分析航空航天典型零件的种类、材料及加工特点的基础上,阐述了航空航天零件材料切削加工性特点及评价方法。书中首先以现代航空发动机中压气机关键零件整体叶盘为对象,在对整体叶盘的结构特性进行分析研究的基础上,探讨了整体叶盘的各种加工技术,总结出数控复合铣削技术是制造整体叶盘的最优方法;然后对数控复合铣削技术中应用的盘铣、插铣和侧铣系列刀具进行分析探讨,在刀具结构设计、刀具几何参数优化和工艺参数优化、刀具成型制造、刀具应用等技术方面开展研究,以保证难加工零件的表面质量,实现航空航天典型零件的高效加工;最后进行了相应的切削加工实验研究,并基于理论研究成果进行了切削工艺参数优化,为实现航空航天典型零件的高效加工提供一定的理论基础和技术支持。

本书可供机械加工工艺及刀具设计、开发与制造等相关领域的科研工作者和工程技术人员参考使用,也可作为高等院校相关专业研究生、高年级本科生及教师的参考工具书。

图书在版编目(CIP)数据

航空航天典型零件加工系列刀具设计应用 / 程耀楠著. —北京: 科学出版社, 2018.4

(哈尔滨理工大学制造科学与技术系列专著)

ISBN 978-7-03-055479-6

I. ①航… II. ①程… III. ①刀具(金属切削)-设计 IV. ①TG702

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第282061号

责任编辑: 裴 育 纪四稳 / 责任校对: 张小霞

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 蓝 正

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年4月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2018年4月第一次印刷 印张: 15 3/8

字数: 312 000

定价: 95.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



前 言

航空航天工业作为国家战略性产业，是国防现代化的重要物质和技术基础，是国家先进制造业的重要组成部分和国家科技创新体系的重要力量。航空航天工业是典型的知识和技术密集型的工业，其发达程度已经成为衡量一个国家科学技术、国防建设和国民经济现代化水平的重要标志。航空航天工业是世界上对技术要求最苛刻的行业之一，航空航天零件由于其复杂的型面以及特殊的材料成为难加工零件。航空航天零件的制造受许多因素的限制，例如，出现越来越多的难加工材料、复杂的几何形状、异常严格的加工要求以及严格的交货时间限制等，与此同时，生产效率还需要不断提高。航空航天零件高效加工已成为航空航天制造业最为重要的目标之一，如何根据不同航空航天零件的材料特性、结构特点等选择合理的刀具、切削参数、加工工艺等尤为重要。

本书在总结过去研究工作的基础上，综合考虑航空航天典型零件结构特点、难加工材料特性及金属材料切削加工性能，针对航空航天难加工材料零件特点进行盘铣、插铣与侧铣加工刀具分析及优化设计，在刀具结构设计、刀具几何参数优化和工艺参数优化、刀具成型制造、刀具应用等方面开展研究，以保证难加工材料零件的表面质量，实现航空航天典型零件的高效加工。航空航天典型零件的机械加工具有挑战性，主要是由于行业规范、材料性能及各种零件装配的要求都很苛刻。这些零件的材料都很难加工，并且形状复杂，要求使用的刀具可达性好，而且编程时要采用正确的走刀路径。发动机零件工作区域温度较高，所以要求工件材料具有更高的硬度、强度、韧性，还要有更好的抗腐蚀或抗氧化性能，材料通常为镍基合金、高强度钛合金、高合金钢和复合材料。和其他材料相比，这些材料的机械加工性能较差，需要掌握更全面的加工工艺知识，选择正确的刀具、刀具组合，采用更好的工况，才能得到最好的机械加工效率。本书从航空航天典型零件入手，分析航空航天零件的种类及难加工性，并以整体叶盘为对象，详细介绍盘铣、插铣和侧铣刀具优化设计方法，并通过切削实验验证刀具优化设计的合理性及有效性。

本书的研究工作得到了“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项“航空发动机整体叶盘高效强力复合数控铣床开发及应用”(2013ZX04001-081)的资助，特此向支持和关心作者研究工作的所有人员表示衷心的感谢。特别感谢教育、支持、帮助作者多年的哈尔滨理工大学机械动力工程学院院长及团队带头人

刘献礼教授,感谢对本书写作提供支持的冯新敏老师及参与研究工作的安硕、左殿阁、张悦、李海超、陈天启、宋旭、孙轼龙、杨金龙、关睿、李鹏飞等研究生。感谢科学出版社为本书出版所付出的辛勤劳动。书中有部分内容参考了有关单位或个人的研究成果,均在参考文献中列出,在此一并感谢。

本书旨在阐述和介绍航空航天典型零件加工工艺及刀具的一些最新进展,希望能对航空航天典型零件的高效加工提供一些有借鉴、应用意义的思路和方法,对读者有所启发。由于航空航天典型零件所面临的加工挑战,其成功的关键在于将最新技术的应用和最佳的刀具解决方案相结合,这给本书的撰写增添了难度,再加上作者水平有限,书中难免存在不妥之处,欢迎广大读者批评指正。

作 者

2017年6月于哈尔滨

目 录

前言

第 1 章 航空航天典型零件分析	1
1.1 航空航天工业发展背景及趋势	3
1.2 航空航天典型零件简介	5
1.2.1 发动机鼓筒类零件	7
1.2.2 发动机机匣类零件	8
1.2.3 发动机轴颈类零件	11
1.2.4 发动机叶片	12
1.2.5 发动机盘类零件	13
1.2.6 发动机整体叶盘	15
1.3 航空航天典型零件材料应用	17
1.3.1 航空航天典型零件材料性能特点	17
1.3.2 高温合金简介	19
1.3.3 钛合金简介	22
1.3.4 铝合金简介	25
1.3.5 复合材料简介	27
1.4 航空航天类零件加工特点	29
1.4.1 发动机鼓筒类零件加工特点	29
1.4.2 发动机机匣类零件加工特点	30
1.4.3 发动机轴颈类零件加工特点	31
1.4.4 发动机叶片加工特点	31
1.4.5 发动机盘类零件加工特点	32
1.4.6 发动机整体叶盘加工特点	32
1.5 本书主要内容	33
参考文献	34
第 2 章 航空航天零件典型材料切削加工性及其切削加工实验研究	36
2.1 材料切削加工性的概念及评定方法	36
2.1.1 材料切削加工性概念	36
2.1.2 材料切削加工性评定方法	36

2.1.3 工件材料切削加工性的评定·····	36
2.2 钛合金切削加工性及其切削加工实验研究·····	37
2.2.1 钛合金分类·····	38
2.2.2 钛合金加工刀具几何参数优选实验研究·····	39
2.2.3 大进给与高速切削钛合金实验研究·····	42
2.2.4 基于刀具寿命的钛合金切削加工实验研究·····	46
2.3 高温合金切削加工性及其切削加工实验研究·····	49
2.3.1 高温合金分类·····	50
2.3.2 高温合金 GH706 切削加工实验研究·····	51
2.4 本章小结·····	58
参考文献·····	59
第3章 整体叶盘加工技术分析·····	61
3.1 整体叶盘结构特性分析·····	61
3.2 整体叶盘加工技术简介·····	62
3.2.1 整体叶盘电火花加工技术简介·····	62
3.2.2 整体叶盘电解加工技术简介·····	67
3.2.3 整体叶盘电子束焊接加工技术简介·····	71
3.2.4 整体叶盘线性摩擦焊加工技术简介·····	75
3.2.5 整体叶盘精密铸造加工技术简介·····	80
3.2.6 整体叶盘数控铣削加工技术简介·····	83
3.3 整体叶盘加工刀具应用分析·····	83
3.3.1 整体叶盘加工盘铣刀具技术简介·····	83
3.3.2 整体叶盘加工插铣刀具技术简介·····	84
3.3.3 整体叶盘加工侧铣刀具技术简介·····	86
3.3.4 可转位刀具的发展现状·····	87
3.4 本章小结·····	88
参考文献·····	88
第4章 盘铣刀具设计及其加工技术研究·····	90
4.1 切槽铣刀的种类·····	90
4.1.1 立铣刀·····	90
4.1.2 三面刃铣刀·····	90
4.1.3 锯片铣刀·····	91
4.2 常用切槽铣刀的选用方法·····	91
4.3 盘铣切削特点及其加工方式·····	92

4.3.1	三面刃铣刀的选用依据	93
4.3.2	盘铣加工的相关参数	94
4.3.3	盘铣刀开槽应用案例	95
4.4	整体叶盘盘铣加工技术研究	98
4.4.1	整体叶盘材料切削加工性分析	99
4.4.2	加工整体叶盘刀具材料的选用	102
4.4.3	切削钛合金刀具设计研究现状	103
4.4.4	盘铣切削过程中刀具的失效形式	104
4.5	整体叶盘盘铣加工区域工艺规划	105
4.5.1	整体叶盘流道可加工性分析	105
4.5.2	盘铣加工区域规划	107
4.5.3	盘铣刀切削运动圆环面轨迹模型建立	108
4.6	盘铣刀优化设计	113
4.6.1	盘铣刀结构类型优选	113
4.6.2	可转位刀片的设计	115
4.6.3	盘铣刀主要结构设计	116
4.6.4	盘铣刀几何参数优化	121
4.6.5	盘铣刀结构强度分析	128
4.6.6	盘铣刀结构模态分析	131
4.7	盘铣刀制备方法研究	133
4.8	本章小结	138
	参考文献	139
第 5 章	插铣刀具设计及其加工技术研究	142
5.1	插铣加工特点及应用	142
5.1.1	插铣加工特点	142
5.1.2	插铣加工应用	143
5.2	插铣加工轨迹及动态切削力模型	143
5.2.1	插铣加工轨迹	143
5.2.2	插铣过程时域模型	144
5.2.3	动态切削力模型	147
5.3	插铣刀参数化系统设计	148
5.3.1	参数化设计	149
5.3.2	UG 中参数化设计方法	149
5.3.3	基于图形模板的参数化设计	149

5.3.4	基于程序的参数化设计	150
5.3.5	参数化系统设计	153
5.4	插铣刀切削仿真分析及几何角度优化	155
5.4.1	有限元仿真模型建立	155
5.4.2	插铣加工仿真分析	157
5.4.3	插铣刀强度分析	162
5.5	插铣刀制备	165
5.5.1	刀体材料的选用	165
5.5.2	刀片材料的选用	166
5.5.3	插铣刀加工制备	167
5.6	本章小结	168
	参考文献	168
第 6 章	侧铣刀具设计及其加工技术研究	170
6.1	侧铣加工特点分析及动态切削力模型的建立	170
6.1.1	侧铣加工特点分析	170
6.1.2	侧铣切削层参数分析与建模	171
6.1.3	球头铣刀刃形及切削力建模	173
6.2	球头铣刀结构设计分析	178
6.2.1	截面形线分析	178
6.2.2	周刃螺旋线分析	180
6.2.3	球刃螺旋线分析	182
6.2.4	退刀槽曲线分析	182
6.3	球头铣刀参数化建模	183
6.3.1	刀具特征变量设定	183
6.3.2	周刃螺旋槽建模	184
6.3.3	球刃螺旋槽建模	185
6.3.4	退刀槽建模	186
6.4	球头铣刀几何角度优化及切削仿真分析	187
6.4.1	有限元仿真的理论简介	187
6.4.2	球头铣刀几何参数优化仿真方案	188
6.4.3	仿真结果分析及几何角度优化	190
6.4.4	球头铣刀结构强度分析	193
6.4.5	整体叶盘侧铣加工仿真研究	195
6.5	球头铣刀的制备与强化处理	196

6.5.1 球头铣刀材料优选	196
6.5.2 球头铣刀的磨制	197
6.5.3 球头铣刀的检测	202
6.5.4 球头铣刀刃口强化处理	203
6.6 本章小结	205
参考文献	205
第7章 钛合金盘铣加工实验研究	207
7.1 实验设计	207
7.2 实验结果与讨论	209
7.3 切削参数的优化	210
7.4 本章小结	214
参考文献	214
第8章 钛合金插铣加工实验研究	215
8.1 实验条件	215
8.2 插铣实验方案	215
8.3 实验数据分析	216
8.4 切削力预测模型的建立	217
8.4.1 预测模型的建立	217
8.4.2 切削力预测模型检验及验证	218
8.4.3 切削力预测模型讨论	220
8.5 切削参数优化研究	221
8.5.1 切削参数优化方法的选择	221
8.5.2 模糊综合评价优化分析	222
8.6 本章小结	226
参考文献	226
第9章 钛合金侧铣加工实验研究	228
9.1 球头铣刀侧铣实验设计	228
9.1.1 实验条件	228
9.1.2 侧铣实验方案	229
9.2 实验结果分析	229
9.2.1 切削力的极差分析	229
9.2.2 切削参数对切削力影响分析	231
9.3 切削力预测模型的建立及验证	232
9.3.1 预测模型的建立	233

9.3.2	切削力预测模型验证	233
9.4	切削参数优化研究	234
9.4.1	切削参数优化条件的确定	234
9.4.2	基于 MATLAB 的切削参数优化	235
9.4.3	切削参数优化结果	235
9.5	本章小结	236
	参考文献	236

第 1 章 航空航天典型零件分析

航空航天工业作为国家战略性产业，是国防现代化的重要物质和技术基础，是国家先进制造业的重要组成部分和国家科技创新体系的重要力量。我国航空航天转型升级以推进航空航天工业技术结构升级和产业结构升级为目标指向，以体制机制转型、科技发展转型、建设模式转型、增长模式转型为基本内容，通过转变发展理念、重新定位战略目标、重新选择发展模式、有效整合要素资源、全面优化策略方法，破解体制机制困局，强化自主创新能力，夯实国防产业基础，推进产业集约发展，建设装备基于能力、能力寓于产业的新型航空航天工业，加快转变战斗力生成模式，提高我国航空航天工业跨越发展的综合能力^[1]。

航空是指飞行器在地球大气层内的航行活动，航天是指飞行器在大气层外宇宙空间的航行活动，图 1.1 为航空航天飞行器。航空航天制造业是一个国家工业实力的体现，在全球“工业 4.0”和“中国制造 2025”的驱动下，毋庸置疑地成为国家工业制造的核心产业。“中国航空航天制造业作为我国的战略产业，在经过数十年的不懈努力下，已经建立起较为完善的技术体系。”中国航空航天工具协会副秘书长范军先生介绍说，“但随着以高新技术为引领的高端技术和装备在航空航天制造业的应用，中国航空航天制造业也迫切需要学习、交流和引进更优秀的先进技术和设备。”

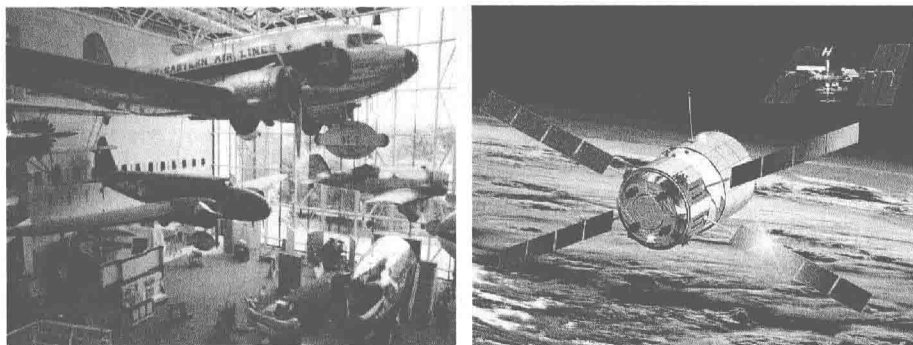


图 1.1 航空航天飞行器

20 世纪以来, 航空航天工业是发展最快的新兴工业。全世界从事航空航天工业的科技人员和工人, 总数达几千万。在一些发达国家, 航空航天工业已经成为国民经济中重要的产业部门。航空航天工业是典型的知识和技术密集型工业, 其发达程度已经成为衡量一个国家科学技术、国防建设和国民经济现代化水平的重要标志之一。图 1.2 为几种典型的航空航天零件。

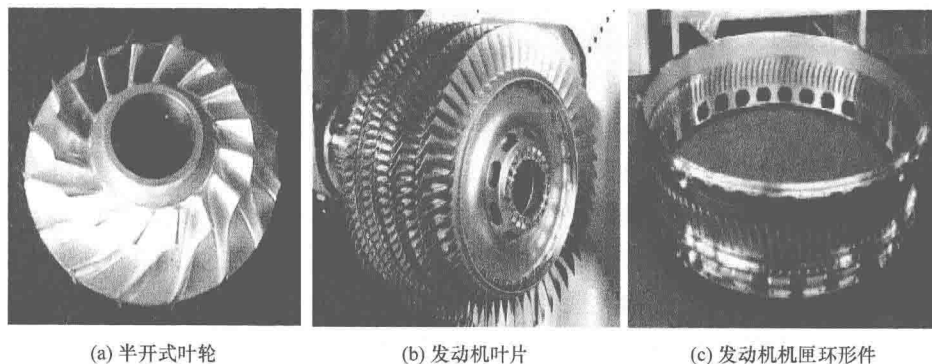


图 1.2 几种典型的航空航天零件

例如, 在对钛合金整体叶盘数控铣削加工过程中, 采用复合铣削的加工方法, 即盘铣开槽, 插铣扩槽, 最后侧铣除棱清根, 该方法的提出对提高钛合金整体叶盘加工效率起着重要作用, 各加工工艺如图 1.3 所示。

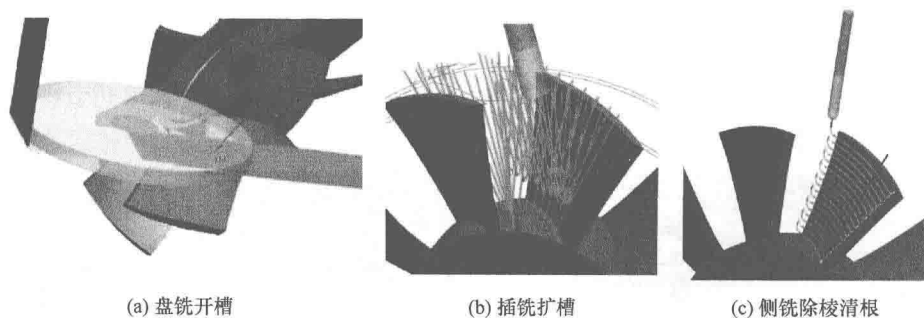


图 1.3 复合铣削加工方法

因此, 本书综合考虑航空航天典型零件结构特点、难加工材料特性以及金属材料切削加工性能, 针对航空航天难加工材料零件特点进行盘铣、插铣及侧铣加工刀具分析以及优化设计, 以保证难加工零件的表面质量, 实现航空航天典型零件的高效加工。

1.1 航空航天工业发展背景及趋势

中国是世界文明古国。古籍中记载了关于飞行的神话、传说和绘画,“嫦娥奔月”是人类最古老的登月幻想。鲁班制作木鸟、西汉时期的滑翔尝试和列子御风的想象,说明古代中国人民已想到利用空气浮力和空气动力升空飞行。

在近代,中国人民也为航空航天的发展做出了自己的贡献。世界上第一架飞机诞生之后,中国许多仁人志士为振兴中华而热心发展航空事业。一些杰出的中国科学家在空气动力、火箭技术、燃烧理论等方面所做的卓有成效的研究,推动了有关学科领域的发展,为国家争得了荣誉。

中国航空事业的蓬勃发展是从中华人民共和国成立之后开始的。1951年成立了航空工业局,随后组建了飞机、发动机和材料工艺等研究机构。1954年制造出第一架教练机(初教5),1956年试制成功第一架喷气式歼击机(歼5),1958年小型多用途运输机(运5)投入使用,同年又自行设计了初级教练机(初教6),1959年第一架超声速喷气式歼击机(歼6)飞上了蓝天,实现了从修理到制造,从生产螺旋桨飞机到喷气式飞机,从仿制到自行研制的转变。1960年建立的中国航空研究院,从事飞机、发动机、仪表、电器、附件、电子设备和航空武器的设计研究,开展了空气动力、结构强度、燃气涡轮、风洞技术、生命保障、材料工艺、导航和控制以及飞行实验等方面的应用研究^[1]。

中国航天事业是在20世纪50年代中期开始的,1956年中国制定了十二年科学技术发展远景规划,把火箭和喷气技术列为重点发展项目。同年建立了第一个导弹、火箭研究机构,1958年把发射人造地球卫星列入国家科学规划,组建机构开展空间物理学研究和探空火箭研制工作,并开展星际航行的学术活动和实验设备的筹建工作。1960年2月发射成功第一枚探空实验火箭,1964年6月发射成功自行研制的第一枚运载火箭,在60年代后期又研制成功中程和中远程运载火箭,为中国航天事业的发展奠定了基础。中国于60年代中期制定了研制和发射人造地球卫星的空间计划。1968年组建了中国空间技术研究院。1970年4月24日,中国第一颗人造地球卫星“东方红”1号发射成功,使中国成为继苏联、美国、法国、日本之后世界上第五个用自制运载火箭成功发射卫星的国家。1971年3月3日发射成功的第二颗人造地球卫星向地面发回了各项科学实验数据,正常工作了8年。1975年11月26日首次发射成功返回型人造地球卫星,成为继美国、苏联之后世界上第三个掌握卫星返回技术的国家。1980年5月,向南太平洋发射大型运

载火箭取得成功, 1981 年 9 月 20 日首次用一枚大型运载火箭把三颗空间物理探测卫星送入地球轨道, 1982 年 10 月从水下潜艇发射运载火箭成功。1984 年 4 月 8 日, 发射了一颗对地静止轨道实验通信卫星“东方红”2 号, 4 月 16 日卫星定点于东经 125°赤道上空。到 1985 年 10 月, 中国依靠自己的力量共发射了 17 颗不同类型的人造地球卫星, 这些卫星为地质、测绘、地震、海洋、农林、环境保护等国民经济部门和空间科学研究提供了十分有价值的资料^[2]。

航空航天现代制造业已经不是传统意义上的机械制造业, 即机械加工。它是当今高科技的综合利用, 是集机械、电子、光学、信息科学、材料科学、生物科学、激光学、管理学等最新成就于一体的一个新技术与新兴工业的综合体。航空航天现代制造业正向以下几个方面发展^[3-5]。

1. 数控技术

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。

2. 高速加工技术

为快速响应全球化市场变化和顾客多元化与个性化需求, 制造业不仅需要产品零件的高质量, 同时需要提高生产率、降低生产成本。高速加工技术作为最有发展前途和极具革命性的技术已成为机械加工技术发展的主流方向。正是因为高速加工(HSM)技术能在保证产品零件精度和质量的前提下提高生产率、降低制造成本, 所以在航空航天制造业中得到广泛应用。采用框中框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, 实现对航空航天器整体结构件的高速高效加工, 如更多采用五坐标联动高速加工中心进行整体结构件加工, 实现高速切削和空间曲面控制能力的综合优势。

3. 复合加工技术

复合加工技术就是尽可能地将零件的各项加工工序集中在一台机床上, 实现“全部加工”, 缩短加工周期, 提高加工效率和加工精度。复合加工技术是数控机

床技术重要发展趋势之一,包括跨加工类别的复合加工和多面多轴联动复合加工等形式。

4. 精密、超精密加工技术

为了提高产品的性能、质量和可靠性,提高装配效率,实现装配自动化,航空航天制造业对加工精度和加工表面质量的要求越来越高。精密、超精密加工技术及机床不断涌现。超精密加工技术已经进入纳米加工技术领域,其在向更高精度发展的同时,也呈现以下发展趋势:高效率 and 大型化、广泛采用软件补偿技术提高加工精度、加工测量一体化、模块化、廉价化、超精密加工工艺方法的多样化。

5. 采用先进制造模式

随着航空航天制造业经济全球化、消费多样化和个性化的发展,其产品生命周期日益缩短。信息技术飞速发展并得到广泛应用,传统的高生产率、低柔性、大产量制造模式已不能适应这种多变市场的实际需求。工业化国家在航空航天工业中纷纷采用各种先进生产模式如计算机集成制造系统、敏捷制造、精益生产、虚拟制造、绿色制造等。它们具有并行性、集成性、柔性、智能性、快速反应性、动态适应性、人机一体性的特点。

1.2 航空航天典型零件简介

航空发动机是飞机的动力装置,为其提供飞行推力,被誉为飞机的“心脏”。随着航空动力技术的发展和国防建设的要求,航空发动机必须满足高速、高空、长航时、远航程、大推重比等新一代机种的需求。因此,航空发动机的结构越来越复杂,精度要求越来越高,精密复杂的零部件大幅增加,而综合性能先进的喷气式发动机是航空动力装备的发展方向,其典型喷气式发动机结构如图 1.4 所示。

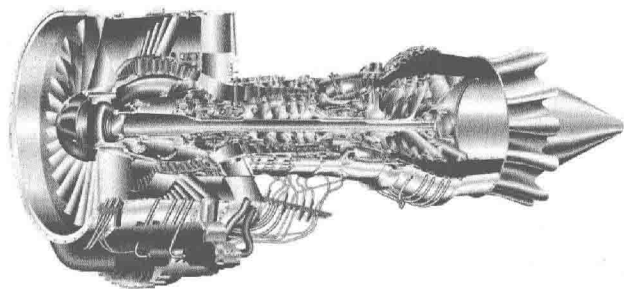


图 1.4 典型喷气式发动机结构

通常喷气式发动机一般由进气装置、压气机、燃烧室、涡轮和喷管等部件组成,其中压气机、燃烧室、涡轮组成发动机的核心机。喷气式发动机的主要工作流程都是在核心机中完成的,包括空气的压缩、燃烧、涡轮做功等。空气经进气道进入发动机后,首先经过压气机,加压后进入燃烧室,与燃料掺混,点火燃烧,形成高温气体,高温气体膨胀驱动涡轮工作,经过涡轮后的燃气通过喷管排出进而产生反向推力,喷气式发动机工作原理如图 1.5 所示。

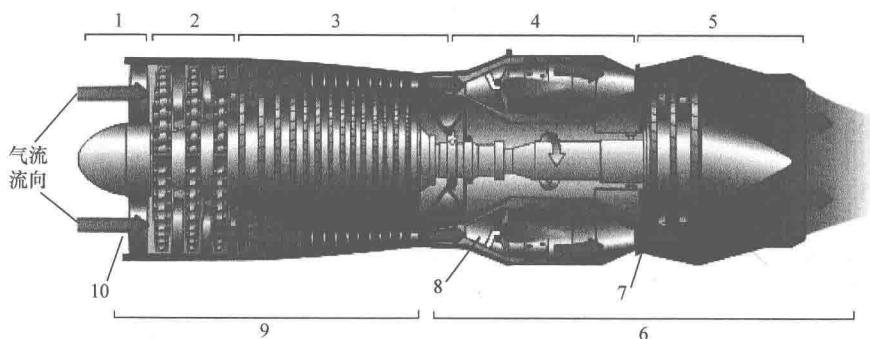


图 1.5 喷气式发动机工作原理图

1-吸入；2-低压压缩；3-高压压缩；4-燃烧；5-排气；6-热区域；7-涡轮机；
8-燃烧室；9-冷区域；10-进气口

压气机的作用是提高进入发动机燃烧室的空气压力,主要参数是增压比和压气机效率。增压比是指空气在压气机出口和进口处压力的比值,压气机效率是指理论上所需要的压缩功与实际消耗的机械功的比值。压气机有离心式和轴流式两种,轴流式压气机增压比和效率较高,因而采用更为广泛。

燃烧室主要由燃料喷嘴、涡流器、火焰筒和燃烧室外套组成,是燃料与高压空气混合燃烧的地方,燃料的化学能在这里转化为热能。喷气式发动机对燃烧室性能的主要要求是点火可靠、燃烧稳定、燃烧完全等。

涡轮的作用是将燃烧室出来的气体热能转化为机械能。涡轮在高温高压气体的冲击下高速旋转,大部分燃气能量转化为机械能用来驱动压气机等附件,剩余能量产生推力。涡轮的功率与涡轮进口温度以及涡轮前后压力比成正比。涡轮中一个主要的零部件为涡轮叶片,通常分为工作叶片(又称动叶)和导向叶片(又称导叶),如图 1.6 所示。燃烧室中产生的高温高压燃气首先经过导向叶片,此时会被整流并通过在收敛管道中将部分压力能转化为动能而加速,最后被赋予一定的角度进而更有效地冲击涡轮工作叶片,部分内能在涡轮中膨胀转化为机械能,驱动涡轮旋转。由于高压涡轮与压气机装在同一轴上,所以也驱动压气机旋转,从