

高校无人机应用技术专业新形态系列教材（总主编：何先定 刘建超 李屹东）

# 无人机 动力装置

（活页式）

主 编 © 严向峰 任 勇



课程思政



活页式



新形态



课件



微课



校企合作

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

-----  
图书在版编目 (C I P) 数据

无人机动力装置 / 严向峰, 任勇主编. —成都:  
西南交通大学出版社, 2022.4  
ISBN 978-7-5643-8566-8

I. ①无… II. ①严… ②任… III. ①无人驾驶飞机  
—动力装置—高等职业教育—教材 IV. ①V279

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2022) 第 004486 号  
-----

Wurenji Dongli Zhuangzhi

**无人机动力装置**

主编 严向峰 任勇

---

责任编辑 刘昕

封面设计 吴兵

---

出版发行 西南交通大学出版社  
(四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号  
西南交通大学创新大厦 21 楼)

邮政编码 610031

发行部电话 028-87600564 028-87600533

网址 <http://www.xnjdcbs.com>

印刷 四川玖艺呈现印刷有限公司

---

成品尺寸 185 mm × 260 mm

印张 18

字数 416 千

版次 2022 年 4 月第 1 版

印次 2022 年 4 月第 1 次

定价 58.00 元

书号 ISBN 978-7-5643-8566-8

课件咨询电话: 028-81435775

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

# 高校无人机应用技术专业新形态系列教材

## 编写委员会

### 主任委员

刘建超 国家教学名师 成都航空职业技术学院

### 副主任委员

何敏 云影系列无人机总设计师 成都飞机工业(集团)有限责任公司

李屹东 翼龙系列无人机总设计师 中航(成都)无人机系统股份有限公司

李中华 国家英雄试飞员 中国人民解放军空军指挥学院

冯文全 北京航空航天大学

任斌 成都纵横自动化技术股份有限公司

董秀军 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室

张秦罡 自然资源部第三航测遥感院

### 总主编

何先定 刘建超 李屹东

### 执行编委(按拼音排序)

陈世江 重庆电子工程职业学院

李乐 国网乐山供电公司

刘清杰 四川航天职业技术学院

王福成 黑龙江八一农垦大学

王利光 成都纵横大鵬无人机科技有限公司

魏永峭 兰州理工大学

许云飞 成都航空职业技术学院

查勇 天府新区通用航空职业学院

江启峰 西华大学航空航天学院

李兴红 成都理工大学工程技术学院

卢孟常 贵州航天职业技术学院

王晋誉 上海民航职业技术学院

王永虎 重庆交通大学

吴道明 重庆航天职业技术学院

徐绍麟 云南林业职业技术学院

周军 厦门大学

### 委员(按拼音排序)

陈宗杰 成都航空职业技术学院

邓建军 成都航空职业技术学院

范宇航 成都航空职业技术学院

冯成龙 成都航空职业技术学院

何达 成都航空职业技术学院

何云华 成都工业学院

姜舟 成都航空职业技术学院

戴升鑫 成都航空职业技术学院

段治强 成都航空职业技术学院

房梦旭 成都航空职业技术学院

付鹏 成都纵横大鵬无人机科技有限公司

何国忠 四川航天中天动力装备有限责任公司

胡浩 天府新区航空旅游职业学院

蒋云帆 西华大学航空航天学院

李 恒	成都航空职业技术学院	李林峰	成都纵横大鹏无人机科技有限公司
李 艳	成都航空职业技术学院	李宜康	成都航空职业技术学院
李懿珂	成都纵横大鹏无人机科技有限公司	李志鹏	中航（成都）无人机系统股份有限公司
李志异	成都航空职业技术学院	廖开俊	中国人民解放军空军第一航空学院
刘 驰	四川航天中天动力装备有限责任公司	刘 奔	成都纵横大鹏无人机科技有限公司
刘佳嘉	中国民用航空飞行学院	刘 健	山西机电职业技术学院
刘 静	重庆科创职业学院	刘明鑫	成都航空职业技术学院
刘 霞	重庆航天职业技术学院	马云峰	成都纵横大鹏无人机科技有限公司
梅 丹	中国人民解放军海军工程大学	牟如强	成都理工大学工程技术学院
潘率诚	西华大学	屈仁飞	成都西南交大研究院有限公司
瞿胡敏	四川傲势科技有限公司	任 勇	重庆电子工程职业学院
沈 挺	重庆交通大学	宋 勇	四川航天中天动力装备有限责任公司
唐 斌	成都航空职业技术学院	田 园	成都航空职业技术学院
王 聪	成都航空职业技术学院	王国汁	中航（成都）无人机系统股份有限公司
王 进	成都纵横大鹏无人机科技有限公司	王朋飞	西安航空职业技术学院
王 强	成都航空职业技术学院	王泉川	中国民用航空飞行学院
王思源	成都航空职业技术学院	王文敬	中国民用航空飞行学院
王 旭	成都航空职业技术学院	王 洵	成都航空职业技术学院
魏春晓	成都航空职业技术学院	吴 可	重庆交通大学
吴 爽	中航（成都）无人机系统股份有限公司	谢燕梅	成都航空职业技术学院
邢海涛	云南林业职业技术学院	熊 斌	西南大学
徐凤磊	中国人民解放军海军工程大学	许开冲	成都纵横自动化技术股份有限公司
闫俊岭	重庆科创职业学院	严向峰	成都航空职业技术学院
杨 芳	成都航空职业技术学院	杨谨源	中航教育科技（天津）有限公司
杨 琴	成都理工大学工程技术学院	杨 锐	成都纵横自动化技术股份有限公司
杨少艳	成都航空职业技术学院	杨 雄	重庆航天职业技术学院
杨 雪	成都航空职业技术学院	姚慧敏	成都航空职业技术学院
尹子栋	成都航空职业技术学院	游 玺	成都纵横大鹏无人机科技有限公司
张 捷	贵州交通技师学院	张 梅	成都农业科技职业学院
张 松	四川零坐标勘察设计有限公司	张惟斌	西华大学
张 伟	成都纵横大鹏无人机科技有限公司	赵 军	重庆电子工程职业学院
郑才国	成都理工大学工程技术学院	周 彬	重庆电子工程职业学院
周佳欣	成都航空职业技术学院	周仁建	成都航空职业技术学院
邹晓东	中航（成都）无人机系统股份有限公司		

# 前言

## PREFACE

“无人机动力装置”是无人机应用专业的一门重要专业基础课程，对后续专业课程的学习以及从事无人机操控、调试、维护、行业应用等相关工作具有重要的支撑作用。本书根据高职院校无人机应用技术专业对无人飞行器动力装置认知及操作实践技能的要求编写而成，理论知识以够用为原则，注重知识和技能的运用；以无人机常用3大类动力系统为载体，以项目式学习方式使学生掌握航空活塞发动机、燃气涡轮发动机及电动机的相关知识和实践技能。

本书内容共包括3个模块，16个项目：模块一讲解航空活塞发动机的内外部结构、附件系统，以及简单勤务维护工作；模块二讲解小、微型无人机中使用的电力动力系统的基本构成与组装调试；模块三介绍高性能燃气涡轮发动机的典型部件结构与原理。每个模块分为若干项目，各项目下布置若干学习任务，以任务为驱动，使学生掌握常见无人机动力装置的基本构成，并能够使用相关理论知识指导实践活动。

本书由成都航空职业技术学院严向峰、重庆电子工程职业学院任勇担任主编，康维国、王旭、李宜康、姜舟、赵军担任副主编。其中，绪论、项目五、六、七、十五、十六由严向峰编写；项目一、二由康维国编写；项目三由李宜康编写；项目四由姜舟编写；项目八、九由王旭编写；项目十、十一、十三、十四由任勇编写；项目十二由赵军编写。严向峰对本书的内容和编写思路进行了总体策划，并进行统稿。

本书在编写过程中，得到了海军工程大学青岛校区徐风磊、梅丹、中国人民解放军空军第一航空学院廖开俊等老师，以及中航（成都）无人机系统股份有限公司李志鹏、吴爽、王国汁、四川傲势科技有限公司瞿胡敏等工程师的支持和帮助，在此一并表示真诚的感谢。

本书在编写构思和选材过程中参考了国内外诸多的文献资料，在此向相关作者表示最衷心的感谢。限于编者水平和经验有限，书中难免有疏漏和不妥之处，敬请广大读者批评指正

编 者

2021年9月

# 目录

## CONTENTS

绪 论	001
任务一 无人机动力装置的类型	001
任务二 航空发动机的发展历程	002
任务三 无人机动力装置的基本要求	006
任务四 无人机动力装置的研发特点及发展趋势	007

## 模块一 活塞发动机

项目一 认识活塞发动机	011
任务一 活塞发动机工作原理	011
任务二 发动机结构和点火顺序	017
项目二 活塞发动机部件认识	023
任务一 结构布局	025
任务二 曲轴箱、曲轴、凸轮轴、油底壳	029
任务三 附件齿轮箱	036
任务四 气缸与活塞组件	038
任务五 连 杆	045
任务六 气门机构	048
任务七 螺旋桨减速齿轮箱	052
项目三 活塞发动机燃油系统认识与检查	056
任务一 汽化器	057
任务二 压力喷射式化油器	065

任务三	发动机电子控制	067
<b>项目四</b>	<b>起动和点火系统认识与检查</b>	<b>071</b>
任务一	起动系统	072
任务二	磁电机的类型、结构和工作原理	076
任务三	点火线束、火花塞	082
任务四	点火系统的地面检查	086
<b>项目五</b>	<b>进气、排气与冷却系统认识与检查</b>	<b>087</b>
任务一	进气系统	089
任务二	排气系统，发动机冷却系统	092
<b>项目六</b>	<b>增压/涡轮增压系统认识与检查</b>	<b>095</b>
任务一	增压原理与目的	096
任务二	涡轮增压系统的结构和工作过程	100
<b>项目七</b>	<b>滑油系统认识与检查</b>	<b>103</b>
任务一	系统工作过程、布局与组件	104
任务二	干/湿槽式滑油系统通用组件	111
任务三	滑油供给	114
任务四	滑油系统故障诊断	116
<b>项目八</b>	<b>发动机监控和地面运行</b>	<b>118</b>
任务一	起动和地面运行程序	122
任务二	发动机和部件检查	126
<b>项目九</b>	<b>活塞发动机的存放与保存</b>	<b>140</b>
任务一	发动机保存	140
任务二	发动机解除保存	144

## 模块二 电动机

<b>项目十</b>	<b>电力动力系统的认识</b>	<b>147</b>
任务一	电力动力系统基础	147



<b>项目十一</b>	<b>直流电机的认知</b> .....	<b>150</b>
任务一	电机的基本知识 .....	152
任务二	直流电动机的结构和原理 .....	154
任务三	无刷直流电机的结构和原理 .....	160
任务四	直流电机的主要参数 .....	165
任务五	无人机电机的选配 .....	167
任务六	直流电机使用及维护 .....	168
<b>项目十二</b>	<b>电子调速器的认知</b> .....	<b>169</b>
任务一	电子调速器的基础知识 .....	170
任务二	电子调速器的主要参数 .....	171
任务三	电子调速器的调试 .....	173
任务四	电子调速器常见故障分析 .....	174
<b>项目十三</b>	<b>电池的认知</b> .....	<b>176</b>
任务一	电池的基础知识 .....	178
任务二	锂电池的原理及特点 .....	183
任务三	电池的主要参数 .....	185
任务四	电池的选配 .....	189
任务五	电池的使用及维护 .....	190
任务六	智能锂电池 .....	193
<b>项目十四</b>	<b>动力系统的组装与调试</b> .....	<b>195</b>
任务一	动力系统的组装 .....	198
任务二	动力系统调试基础知识 .....	206
任务三	动力系统的调试 .....	212

## 模块三 燃气涡轮发动机

<b>项目十五</b>	<b>认识燃气涡轮发动机</b> .....	<b>216</b>
任务一	基础知识 .....	216
任务二	燃气涡轮发动机类型 .....	227
任务三	燃气涡轮发动机工作原理及重要参数 .....	234

<b>项目十六</b>	<b>航空涡轮轴发动机部件认识</b> .....	<b>237</b>
任务一	进气装置 .....	237
任务二	压气机 .....	241
任务三	燃烧室 .....	252
任务四	涡轮 .....	263
任务五	减速器 .....	275
任务六	排气装置 .....	277
<b>参考文献</b>	.....	<b>278</b>

# 绪 论

航空发动机 ( Aero-engine ) 是为航空器提供飞行所需动力的装置，是一种高度复杂和精密的热力机械，直接影响航空飞行器的飞行性能、可靠性与经济性，被誉为“工业之花”。航空发动机是一种集成多学科知识、复杂系统、高度综合的高新技术产品，按照产品单位质量创造的价值来计算，如船舶为 1、小汽车为 9、电视机为 50、电子计算机为 300、大型飞机为 800，航空发动机 ( 大型燃气涡轮发动机 ) 则高达 1 400。

与世界航空工业的三极——美国、西欧及俄罗斯相比，我国航空工业建立时间晚，技术基础薄弱，与世界先进水平还存在不小的差距，但同时也要看到，世界上拥有完整航空工业体系的国家屈指可数。因此，作为能够独立开展航空发动机研制的国家之一，我国在工业水平方面还是值得肯定的。

## 任务一 无人机动力装置的类型

用于载人航空飞行器上的航空发动机本质上是热机，它将燃料的热能转换为机械能，同时作为一个推进器，可以利用产生的机械能使发动机获得推力。根据能量转换的方式和规律，应用于无人机动力装置的航空发动机主要分为航空活塞式发动机与航空喷气式发动机两大类型。近年来，随着轻小型无人机的高速发展，使用电动机作为一种廉价且安全性更高的方案，其应用范围也在不断扩大。无人机上使用的发动机类型如图 0-1 所示。

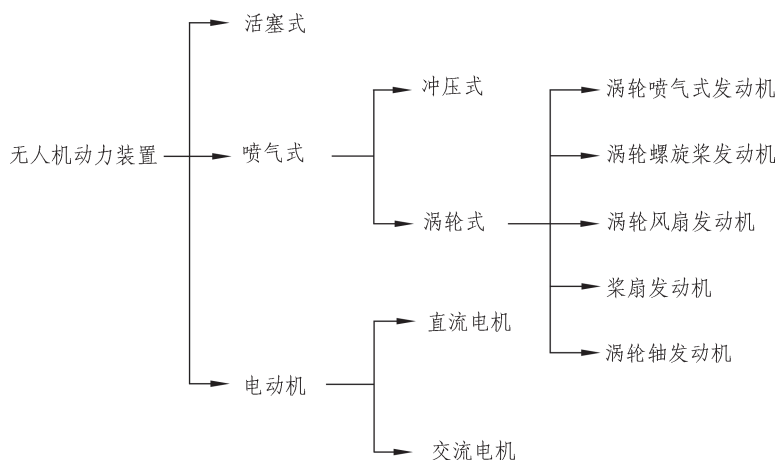


图 0-1 发动机类型

航空活塞式发动机早期应用于固定翼飞机或直升机，用于带动螺旋桨或旋翼，提供飞行动力。其历史可追溯至 20 世纪初 ( 1903 年莱特兄弟发明的飞行者 1 号 )，在第二次世界大战末期发展到顶峰。大型活塞式航空发动机的功率可达 2 500 kW，后来虽

然被功率更大、高速性能更好的燃气涡轮发动机所取代，小功率的活塞式发动机仍广泛用于轻型飞机、直升机及超轻型飞机。早期的无人机通常由退役有人战斗机改装而成，目前多数无人机仍采用活塞式发动机。活塞式发动机适用于低速、中低空的侦察、监视无人机及长航时无人机，飞机起飞质量一般较小。

第二次世界大战结束至今 70 年来，航空燃气涡轮发动机取代了活塞式发动机，开创了喷气时代。在技术发展的推动下，涡轮喷气发动机、涡轮风扇发动机、涡轮螺旋桨发动机、桨扇发动机和涡轮轴发动机在不同的飞行领域发挥着各自的作用，航空器性能跨上一个又一个台阶。涡喷发动机适用于飞行时间较短的中高空、高速侦察机及靶机、无人攻击机，飞机起飞质量可达 2 500 kg；涡轴发动机适用于中低空、低速短距/垂直起降无人机和倾转旋翼无人机，飞机起飞质量可达 1 000 kg；涡桨发动机适用于中高空长航时无人机，飞机起飞质量可达 3 000 kg；涡扇发动机适用于高空长航时无人机和无人战斗机，飞机起飞质量可以很大，如“全球鹰”达到 11.6 t。

航空活塞式发动机与喷气式发动机相比，它们的工作原理是相同的，工作循环均需要进气、压缩、燃烧、膨胀做功、排气五个阶段。不同的是，活塞式发动机工作过程是分时依次进行，而喷气式发动机则是连续进行，工质（空气与燃气）依次流经发动机的各个部位，对更大使用范围的无人机而言，燃气涡轮发动机应是首选的动力装置。随着燃气涡轮发动机技术的不断进步，其推重比/功质比越来越高，耗油率越来越小，寿命越来越长，使用维修成本越来越低。

在消费级无人机及部分工业级无人机型号中，电动机作为动力装置。动力电机可分为两类：有刷电动机和无刷电动机，其中有刷电动机由于效率比较低，在无人机领域已逐渐不再使用。无人机使用电动机具有结构简单、质量轻、使用方便等优点，可使无人机的噪声和红外特征很小，还能提供与内燃机不相上下的功率比，同时，低廉的成本也使得无人机更加快速地应用于专业领域，投身消费市场。

## 任务二 航空发动机的发展历程

航空发动机是集计算流体力学、气动热力学、结构力学、传热、控制、材料、工艺等于一身的高科技，也是推动工业进步的高附加值产品。发动机是无人机整套动力系统的核心部件，为飞行提供动力，推动飞行器升空并维持其在空中飞行，它的性能优劣将直接影响航空器飞行的可靠性。回顾人类航空史，一系列重大成就都与航空发动机性能的改善或新型动力装置的研制成功有关。航空发动机诞生一百多年来，其发展历程主要经过了两个阶段。

### 1. 1903—1945：活塞式发动机时代

很早以前，我们的祖先就幻想像鸟一样在天空中自由飞翔，也曾作过各种尝试，但是多半因为动力问题未获得解决而归于失败。最初有人把专门设计的蒸汽机装到飞机上进行尝试，但因为蒸汽机功重比低、效率差，都没有成功实现飞行。到 19 世纪末，内燃机开始用于汽车的同时，人们随即联想到能否把内燃机用到飞机上作为飞行的动

力来源，并着手这方面的试验。

1903年，莱特兄弟把一台4缸水平直列式水冷发动机改装之后，成功地用于“飞行一号”进行飞行试验。这台发动机只有8.95 kW，质量却有81 kg，功重比为0.11 kW/daN（1 daN = 10 N）。发动机通过两根像自行车那样的链条，带动两个直径为2.6 m的木制螺旋桨。“飞行一号”首次飞行的留空时间只有12s，飞行距离为36.6 m。但它是人类历史上第一次有动力、载人、持续、稳定、可操作的重于空气的飞行器成功飞行。

在两次世界大战的推动下，活塞式发动机不断改进完善，得到迅速发展，第二次世界大战结束前后达到其技术的顶峰。发动机功率从近10 kW提高到2500 kW，功重比从0.11 kW/daN提高到1.5 kW/daN，飞机飞行高度达15000 m，飞行速度从16 km/h提高到近800 km/h，接近了螺旋桨飞机的速度极限。

20世纪30~40年代是活塞式发动机的全盛时期。活塞式发动机加上螺旋桨，构成了所有战斗机、轰炸机、运输机和侦察机的动力装置；活塞式发动机加上旋翼，构成所有直升机的动力装置。著名的活塞式发动机有英国的梅林V型12缸液冷式发动机，功率为1120 kW，用于“飓风”“喷火”和“野马”战斗机；美国普拉特·惠特尼公司（简称普惠公司）的“黄蜂”系列星形气冷发动机，气缸有7~28个，功率为970~2500 kW，广泛用于各种战斗机、轰炸机和运输机。

带螺旋桨活塞式发动机的最大缺点是飞行速度受到限制（800 km/h以下）。一方面，发动机功率与飞行速度的三次方成正比，随着速度的提高，所需发动机功率急剧增大，而通过增加气缸数目来增大功率的做法带来了发动机负荷增大，这是飞机不能承受的；另一方面，随着飞行速度的提高，螺旋桨的效率急剧下降并有机毁人亡的危险。因此，为了实现高速飞行，飞机必须寻求新的动力装置，那就是喷气式发动机。第二次世界大战之后，随着涡轮喷气发动机的发展，活塞式发动机逐渐退出了航空领域的霸主地位，但直至今日，在无人机领域中仍然得到了广泛的应用。

## 2. 1939 至今喷气式发动机时代

喷气式发动机是一种直接反作用推进装置。低速工质（空气和燃料）经增压燃烧后以高速喷出而直接产生反作用推力。由于没有限制飞行速度的螺旋桨，而且单位时间流入发动机的空气流量比活塞式发动机大得多，从而能产生很大的推力，喷气发动机使飞机的飞行速度得到极大的提高。

与喷气发动机原理有关的研究有着悠久的历史，中国古代的火箭和走马灯就是喷气推进和涡轮机原理的体现。1913年，法国工程师雷恩·罗兰获得第一个喷气发动机专利，它属于无压气机式空气喷气发动机，与后来的冲压发动机基本相同，压气机式空气喷气发动机则由英国人弗莱克·惠特尔和德国人汉斯·冯·奥海因在同一时期分别发明。压气机有离心式、轴流式、组合式等多种，由后面的燃气涡轮带动，所以这类发动机又称为涡轮喷气发动机。

奥海因在1938年10月试验了采用轴流-离心组合式压气机的HeS3涡轮喷气发动机，实测推力400 daN，推力重力比1.12。1939年8月27日，德国亨克尔公司的He-178飞机成功首飞，这是世界上第一架试飞成功的涡轮喷气发动机飞机。空军少校惠特尔1937年4月研制出世界上第一台离心式涡轮喷气发动机，试验中发动机达到的推力为

200 daN。1941 年 5 月，推力为 650 daN 的改进型惠特尔发动机装在格洛斯特公司的 E28/29 飞机上进行了成功的首飞。

喷气式飞机在二战后特别是 20 世纪 50 年代才获得迅速的发展。第一批装备部队使用的喷气式战斗机是 1944 年美国制造的 F-80 和 1946 年苏联制造的米格-9，飞机采用平直梯形机翼，发动机推力为 800~900 daN，飞行速度为 900 km/h 左右。飞机速度达到声速以后，为了突破“声障”，在涡喷发动机上加装了加力燃烧室，它可以在短时间内大幅度提高推力。此后，战斗机继续向高空高速发展。1958 年美国推出 F-104 战斗机，最大飞行马赫数 2.2，使用升限 17.68 km，动力为 J79 单转子加力式涡轮喷气发动机，最大推力为 7 020 daN，推重比为 4.63。涡轮喷气发动机在军用战斗机上广泛应用的同时，也被其他机种选用，首先是轰炸机，随后是运输机、旅客机和侦察机。

如果把 20 世纪 40~50 年代研制的单轴涡轮喷气发动机算为第一代，那么 50~60 年代研制的加力式涡轮喷气发动机为第二代，其循环和性能参数水平：涡轮前燃气温度 950~1 100 °C，推重比 4.5~5.5，不加力耗油率 0.9~1.0 kg/(daN·h)，加力耗油率约 2.0 kg/(daN·h)。

涡喷发动机有一个致命的缺点，就是耗油率太高，涡扇发动机能克服这个缺点。涡扇发动机与涡喷发动机的区别在于低压压气机变成叶轮风扇，风扇出口气流分成二股通过内外两个环形涵道向后流动。内涵道内工质的工作状况与前述涡轮喷气发动机相同，外涵道的空气则经过涵道直接排出，或在低压涡轮后与主流混合经喷管排出，或加力补燃后排出。在核心相同的条件下，涡轮风扇发动机总空气流量大，排气速度低，所以与涡轮喷气发动机相比，推力大，推进效率高，耗油率低。涡轮风扇发动机实质上仍属于直接反作用式涡轮喷气发动机。

涡扇发动机诞生于 20 世纪 50 年代，首先用于民用飞机，随后扩展到军用飞机。20 世纪 60 年代出现涡扇化热潮，70~80 年代发展提高、广泛应用，90 年代以后高度发展，取代涡喷发动机成为军民用飞机的主动力和航空推进技术研究发展的主要方向。

世界上第一台运转的涡轮风扇发动机是德国戴姆勒-奔驰研制的 DB670（或 109-007），于 1943 年 4 月在实验台上达到 840 kg 推力，但因技术困难及战争原因没能获得进一步发展。世界上第一种批量生产的涡扇发动机是 1959 年定型的英国康维，推力为 5 730 daN，用于 VC-10、DC-8 和波音 707 客机。涵道比有 0.3 和 0.6 两种，耗油率比同时期的涡喷发动机低 10%~20%。1960 年，美国在 JT3C 涡喷发动机的基础上改型研制成功 JT3D 涡扇发动机，推力超过 7 700 daN，涵道比 1.4，用于波音 707 和 DC-8 客机以及军用运输机。

以后，涡扇发动机向低涵道比的军用加力发动机和高涵道比的民用发动机的两个方向发展。在低涵道比军用加力涡扇发动机方面，20 世纪 60 年代，英、美在民用涡扇发动机的基础上研制出斯贝-MK202 和 TF30，分别用于“鬼怪”F-4M/K 战斗机和 F111（后又用于 F-14 战斗机）。它们的推重比与同时期的涡喷发动机差不多，但耗油率低，使飞机航程大大增加。在 70~80 年代，各国研制出推重比 8 一级的涡扇发动机，如美国的 F100、F404、F110，西欧三国的 RB199，苏联的 RD-33 和 AL-31F。它们装备目前在一线的第三代战斗机，如 F-15、F-16、F-18、“狂风”、米格-29 和苏-27。目前，推重比 10 一级的涡扇发动机已研制成功，投入服役的机型包括美国的 F-22/F119、

西欧的 EFA2000/EJ200 和法国的“阵风” M88。其中，F-22/F119 具有第四代战斗机代表性特征——超声速巡航、短距起落、超机动性和隐身能力。自 20 世纪 70 年代第一代推力在 20 000 daN 以上的高涵道比（4~6）涡扇发动机投入使用以来，大型宽体客机开始了新时代。后来，推力小于 20 000 daN 的不同推力级的高涵道比涡扇发动机开始广泛用于各种干线和支线客机。10 000~15 000 daN 推力级的 CFM56 系列已生产 13 000 多台，并创造了机上寿命超过 30 000 h 的记录。民用涡扇发动机投入使用以来，已使巡航耗油率降低一半，噪声下降 20 dB，CO、UHC、NOX 等污染物排放分别减少 70%、90%、45%。90 年代中期装备波音 777 的第二代高涵道比（6~9）涡扇发动机的推力超过 35 000 daN。其中，通用电气公司 GE90-115B 在 2003 年 2 月创造了 56 900 daN 的发动机推力世界纪录。

在涡轮喷气发动机蓬勃发展的过程中，驱动飞机螺旋桨和直升机旋翼的动力也实现了涡轮化，派生出两种新型航空燃气涡轮发动机——涡轮螺旋桨发动机和涡轮轴发动机。它们的工作原理基本相同，都是靠动力涡轮把燃气发生器出口燃气中的绝大部分可用能量转变为轴功率，通过减速器驱动螺旋桨或旋翼。它们与活塞式发动机相比，质量轻、振动小、功率重力比大。

在第二次世界大战中，英国开始研制本国第一台涡桨发动机罗尔斯-罗伊斯 RB.50 Trent，美国、法国、苏联等国也都积极发展了这项技术。因为涡轮螺旋桨发动机比涡喷和涡扇发动机的耗油率更低、经济性好、起飞推力大，曾得到相当的发展，目前在中小型运输机和通用飞机上仍有广泛用途。其中加拿大普惠公司的 PT6A 发动机是典型代表，至今这个功率为 350~1 100 kW 的发动机系列已发展出 30 多个改型，用于 144 个国家的近百种飞机，共生产了 30 000 多台。20 世纪 90 年代美国在 T56 和 T406 的基础上研制出新一代高速支线飞机用的 AE2100 是当前最先进的涡桨发动机，功率范围为 2 983~5 966 kW，其起飞耗油率特低，为 0.249 kg/(kW·h)。

20 世纪 80 年代后期掀起了一阵性能上介于涡桨发动机和涡扇发动机之间的桨扇发动机热。一些著名的发动机公司都在不同程度上进行了预计和试验，其中通用电气公司的无涵道风扇（UDF）GE36 曾进行了飞行试验。由于种种原因，只有俄罗斯和乌克兰的安-70/D-27 进入工程研制并计划批量生产装备部队。

世界上最早研制涡轴发动机的是法国。20 世纪 50 年代中期，透博梅卡公司研制的功率为 405 kW 的阿都斯特 2 涡轴发动机成功用于“云雀”2 直升机。至今涡轴发动机经过不断改进创新，已经发展到第四代，功重比已从 2 kW/daN 提高到 6.8~7.1 kW/daN。第三代涡轴发动机是 20 世纪 70 年代设计、80 年代投产的产品，主要代表机型有马基拉、T700-GE-701A 和 TV3-117 VM，装备 AS322“超美洲豹”、UH-60A、AH-64A、米-24 和卡-52。第四代涡轴发动机是 20 世纪 80 年代末 90 年代初开始研制的发动机，代表机型有英、法联合研制的 RTM322、美国的 T800-LHT-800、德法英联合研制的 MTR390 和俄罗斯的 TVD1500，用于 NH-90、EH-101、WAH-64、RAH-66“科曼奇”、PAH-2/HAP/HAC“虎”和卡-52。世界上最大的涡轮轴发动机是乌克兰的 D-136，起飞功率为 7 500 kW，装两台发动机的米-26 直升机可运载 20 t 的货物。以 T406 涡轮轴发动机为动力的倾转旋翼机 V-22 突破常规旋翼机 400 km/h 的飞行速度上限，一下子提高到 638 km/h。

### 3. 电动机开始应用，新概念动力装置崭露头角

质量小于 100 kg 的微小型无人机，一般采用“电池+电动机”带动旋翼或螺旋桨作为动力装置。其动力系统结构简单，成本低廉，功率大小可随意选择，目前市场上常见的消费级多旋翼无人机均采用电动机作为其动力装置。但是由于目前电池自身的能量密度太低，采用电池带动电动机的动力形式无法保证无人机的长时间飞行(>1 h)，因此极大地限制了它的应用场景。

由于没有人类生命保障要求的限制，无人机的应用范围大大增加，特别是在超高过载、超长航时、超高声速等非传统有人机应用领域将大放异彩。因此，各国在继续发展传统航空发动机技术的同时，都在积极探索基于未来无人机应用的新概念发动机架构，如针对未来高超声速飞行器、空天飞机等应用场景发展出的超燃冲压发动机、脉冲爆震发动机、涡轮基组合发动机、火箭基组合发动机等；针对未来全电和多电飞机研发的混合动力系统和核动力发动机等。美国赛峰公司已经于 2017 年发布了航空电推进技术路线图，并于 2018 年进行了分布式混合电推进系统地面试验。

## 任务三 无人机动力装置的基本要求

发动机作为无人机动力装置的核心，其工作质量的好坏将直接影响飞行性能、安全以及飞行任务的完成情况。因此，一般用发动机性能参数、可靠性、维护性及寿命等主要方面来衡量动力装置的优劣。发动机的基本要求可归纳如下。

### 1. 功率质量比大

对于航空飞行器而言，节约每千克的质量都是有意义的，因此，在无人机动力装置设计和制造的过程当中，在满足结构强度及使用性能要求的前提下，发动机的质量越轻越好。功率质量比就是用来衡量发动机此项要求的标准，即发动机最大功率与发动机总质量之间的比值。航空喷气式发动机常用推重比（最大推力/总质量）来衡量发动机性能。功率质量比（推率质量比）也可以理解为单位质量的动力装置由多大的功率（推力）去驱动，比值越大，则表征在输出相同功率的前提下，发动机自身可以更轻。

### 2. 低燃油消耗

燃油消耗率是典型的经济性指标，指的是产生单位功率（推力）时，动力装置每小时所消耗的燃油质量。燃油消耗率越低的发动机越省油，在航程相同的飞行任务中可携带更少的燃油，降低起飞质量，提高飞行性能。在以电动机作为动力装置的无人机中也有类似的概念。

### 3. 结构尺寸小

结构尺寸较小的动力装置在飞行器内占据的空间更小，有利于飞行器装载更多的



设备及任务载荷；同时，也有利于飞行器气动外形结构的设计，进一步降低飞行中的气动阻力。通常使用迎风面积来衡量此项指标，即发动机在垂直于气流平面内的最大投影面积。飞行时气动阻力的大小与迎风面积有着直接的关系。

#### 4. 可靠性好

可靠性指元件、产品、系统在一定时间内、在一定条件下无故障地执行指定功能的能力或可能性。无人机在设计、制造、应用过程中，不断经受自身、外界气候环境及机械环境的影响，而仍需要能够正常工作，其动力装置必须始终处于可靠运行的工作状态。为了保证航空发动机工作安全可靠，设计时必须考虑复杂使用环境的影响，并在制造生产、装配调试的过程中严格执行工艺流程，避免人为因素造成对发动机的不良影响，经过长时间的“试车”工作对诸项性能参数进行验证后才能装上飞行器。在使用过程中，还需要对发动机进行定期的检查和维护。

#### 5. 寿命长

在保证性能良好、稳定可靠的基础之上，要求动力装置能够拥有更长的寿命，这是航空动力装置的另一项重要的经济性指标。航空发动机的寿命可以分为以下两类：

翻修寿命，指从全新发动机开始使用到第一次翻修之间的时间，或发动机上次翻修后到下一次翻修之间的使用时长；

使用寿命，指全新发动机开始使用直至报废的使用时间。

#### 6. 良好的可维护性

定期和不定期对航空发动机进行的检查、保养和修理工作，是保证发动机工作稳定可靠的重要工作。为了保证飞行安全，对航空发动机维护的技术要求十分严格，维护工作必须保证发动机经常处于良好状态。可维护性是指当发动机发生故障后，能够在较短时间内，比较容易地通过维护或维修排除故障，保持或恢复到正常工作状态的能力。

在无人机动力装置设计时，较强的可靠性能减少发动机出现故障的次数，并不能说明出现故障后能不能修好以及所需要花费的时间和代价。可维护性好的无人机动力装置，能在最短的时间，以最低限度的资源（人力与技术水平、备件、维修设备和工具等）和最少的费用，经过维修后恢复到正常工作状态。可维护性是发动机可靠性的必要补充。

## 任务四 无人机动力装置的研发特点及发展趋势

航空发动机所需的主要科学基础是支持其高温、高速旋转和长工作寿命等工作特点的学科，如工程热力学、气体动力学、燃烧学、传热学和现代控制理论等。而其所需技术几乎覆盖材料、制造、试验等所有现代技术门类，特别是高温材料和热工艺。

航空发动机的工作过程极为复杂，以燃气涡轮发动机的核心机为例。压气机将进入发动机的空气逐级增压，增压比可达 25 以上，压气机叶片的气动、强度和几何形状

十分复杂，承受极高的离心载荷。燃烧室是保证增压后的空气与燃油充分混合，并稳定燃烧的特殊结构，需精心设计，选择耐高温材料、涂层等综合措施以实现有效的冷却。涡轮的作用是将气流的能量转换为机械能，为了获得更大功率，要求涡轮进口处燃气温度尽可能高。先进发动机的涡轮前温度已达 1 850~1 950 K，大大超过涡轮叶片材料本身能承受的温度，需探索使用耐更高温度的材料，并采用新的冷却技术。

发动机装载在航空器上，处于严酷的使用环境当中，需要在高温、高寒、高速、高压、高转速、高负荷、缺氧、振动等极端恶劣环境下，稳定可靠地工作。在飞行中绝不可能进行停机维修，因而可靠性要求极高，目前每百万飞行小时的空中停车率只允许 2~5 次。如此之高的可靠性要求，是其他任何工业产品不可比拟的。以发动机的热部件为例，它们强烈依赖如定向凝固高温合金、单晶、金属间化合物、金属基复合材料和陶瓷基复合材料等先进特殊材料，而由于目前基础工业提供的支撑还不够，直接导致发动机的性能及可靠性等关键指标达不到设计要求，或者无法完成稳定生产。

航空发动机的技术研发难度高于飞行平台，研制周期也长于飞行平台，航空发动机的研发周期一般比飞机机体长 5 年以上，且新型发动机研发所需时间不断延长。在以先进航空器的需求来牵引发展的同时，发动机研制更要遵循独立和超前的发展规律，提前谋划，超前发展。离开配套的飞行平台，航空发动机没有独立的实用价值。但这绝不意味着，航空发动机的研制必须依附于特定的航空器型号。在过去很长一个历史时期，我国航空发动机的研发紧紧依附于飞机型号，即要研制一款飞机，才会去研发配套发动机，飞机如果下马，发动机随之下马。这类实例，举不胜举，发动机少有走完研制过程、积累完整工程数据的型号，这方面的教训十分深刻。

另外，航空界有“航空发动机是试出来的”一说，揭示了航空发动机研发的一大特点，即对试验和高性能设施的高度依赖。航空发动机的试验是一个体系，含性能试验、通用性试验、耐久性试验、环境试验和飞行试验，每个类别的试验又包括若干试验项目。而每次试验的背后，一定是高性能的各类试验手段与设施。由于技术难度大，航空发动机的研制是研究—设计—试验—修改设计—再试验的反复迭代过程。研制一台新型发动机，一般需要 10 万 h 的零部件试验、4 万 h 的附件试验和 1 万 h 的整机试验。航空发动机是设计、制造的产物，更是试验工程的产物。

在科学技术飞速发展的今天，我们既要在传统样式的发动机方面迎头追赶，又要开展新概念、新原理、新能源、新样式航空发动机技术的研究和开发，力争在影响未来的前沿技术领域上有更大的突破，为长远持续发展提供更多的技术储备。

动力装置仍是无人机发展的瓶颈，无法满足无人机发展的迫切需求，必须重点解决。

## 1. 远近结合，统筹规划

无人机用途广泛，品种繁多，是当前研究的热点。应制定合理的无人机发展路线，合理谋划无人机动力装置的发展战略，尤其是与国家国防及经济建设密切相关的无人机动力装置，如中小型涡扇发动机，应作为重中之重，优先发展。

## 2. 重点突破，快速改型

以需求为牵引，选择成熟的有人驾驶飞机所用的航空发动机进行改进改型研究，

以快速突破无人机动力装置适应性改进的关键技术，在较短时间内形成产品。

### 3. 加强预研，自主创新

应从长远出发，坚持动力先行的原则，积极开展无人机动力装置的预先研究和自主创新工作，为适应未来无人机发展的要求打下坚实的基础。动力装置类型不同，预先研究也应各有侧重。高空长航时无人机发动机的关键技术包括高空低雷诺数条件下风扇、压气机喘振，高、低压涡轮效率，高空低压下燃烧室稳定燃烧，发动机数字控制系统可靠控制，整机和部件在宽广工作范围的性能、可操纵性特性与极限；无人直升机涡轴发动机的关键技术包括小流量、高压比组合压气机效率，小流量燃油喷嘴高质量雾化，小型高温涡轮叶片冷却，高速转子动力学；小型无人机涡喷发动机的关键技术包括由尺寸小带来的低雷诺数下部件的效率，高速转子动力学，小型部组件及零件精密加工工艺，发动机润滑等。

# 模块一

无人机动力装置

# 活塞发动机