

卓越工程师教育培养计划配套教材

飞行技术系列

# 航空动力装置

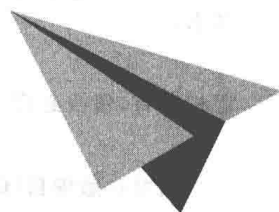
吕鸿雁 郝建平 主编



清华大学出版社

卓越工程师教育培养计划配套教材

飞行技术系列



# 航空动力装置

吕鸿雁 郝建平 主编

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书分为上、下篇,上篇介绍航空活塞式发动机,下篇介绍航空燃气涡轮发动机。上篇包括三章,第1章介绍航空活塞式发动机的组成和工作原理,着重介绍四冲程活塞发动机的工作过程;第2章介绍航空活塞式发动机的工作系统;第3章介绍航空活塞式发动机的性能。下篇共有5章,第4章介绍航空燃气涡轮发动机主要类型及性能指标;第5~8章介绍涡喷发动机的部件结构和工作原理,包括进气道、压气机、燃烧室、涡轮和喷管;第9章介绍涡喷发动机的部件共同工作及特性,包括稳态工作时各部件的相互制约关系,发动机的转速特性、高度特性和速度特性;第10章介绍涡轮风扇发动机的组成和工作特点;第11章介绍涡轮螺旋桨发动机和涡轮轴发动机。

本书适用于民航飞行技术专业学生,也可作为机务维修、空中交通管制等其他民航相关专业学生的参考书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

航空动力装置/吕鸿雁,郝建平主编. —北京:清华大学出版社,2017  
(卓越工程师教育培养计划配套教材.飞行技术系列)  
ISBN 978-7-302-48788-3

I. ①航… II. ①吕… ②郝… III. ①航空发动机—高等学校—教材 IV. ①V23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 267199 号

责任编辑:赵 斌  
封面设计:常雪影  
责任校对:赵丽敏  
责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:10.5

字 数:256千字

版 次:2017年11月第1版

印 次:2017年11月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:35.00元

产品编号:046438-01

# 卓越工程师教育培养计划配套教材

## 总编委会名单

主任：丁晓东 汪 泓

副主任：陈力华 鲁嘉华

委员：(按姓氏笔画为序)

丁兴国	王岩松	王裕明	叶永青	刘晓民
匡江红	余 粟	吴训成	张子厚	张莉萍
李 毅	陆肖元	陈因达	徐宝钢	徐新成
徐滕岗	程武山	谢东来	魏 建	

# 卓越工程师教育培养计划配套教材

## ——飞行技术系列子编委会名单

主任：汪 泓 丁兴国 郝建平

副主任：谢东来 陈力华 魏 建

委员：(按姓氏笔画为序)

卫国林 马银才 王秉良 王惠民 史健勇

石丽娜 匡江红 吴 忠 陆惠忠 范海翔

郝 勇 徐宝钢 贾慈力 隋成城 鲁嘉华



我国“十二五”发展规划的重点建设目标之一,是根据国民经济发展对民航业的要求,不断扩充与优化配置航线和飞机等资源。在民航业持续快速发展的同时,必然会使飞行专业技术人才高度匮乏。在《中国民用航空发展第十一个五年规划》中,中国民用航空局对未来20年全行业人才需求进行了预计分析,其中,“十二五”期间需增加飞行员16500人。因此,飞行技术人才的培养是推动或阻碍民航发展的关键。

与其他本科专业相比,飞行技术专业的学生除了学习掌握飞行原理、飞机系统、航空动力装置、航空气象、空中领航、机载设备、仪表飞行程序设计、空中交通管制等飞行技术的专业知识外,还需具备一定的管理能力和较高的英语水平。并且,飞行技术专业人才的培养多采用学历教育与职业教育同步实施的模式,要求同时取得学历、学位证书和职业技能证书(飞行驾驶执照)后,才有资格担任民航运输机副驾驶员。

飞行技术人才培养具有专业性强、培养难度大和成本高的特点。伴随着大型民用运输机的生产与发展,必然要求提高飞行员的学历层次。国内设置飞行技术本科专业的高等院校仅有中国民航飞行学院、中国民航大学、北京航空航天大学、南京航空航天大学、上海工程技术大学等几所。而且,培养学士学位飞行技术人才的历史仅二十多年,尽管积累了一定的培养经验,但适用的专业教材相对较少。

在飞行技术专业的学科建设中,上海工程技术大学飞行学院和航空运输学院秉承服务国家和地区经济建设的宗旨,坚持教学和科研相结合、理论和实践相结合。2010年,上海工程技术大学飞行技术专业被列为教育部卓越工程师教育培养计划的试点专业,上海工程技术大学被列为教育部卓越工程师教育培养计划的示范单位。为满足飞行技术专业卓越工程师教育培养的需要,上海工程技术大学从事飞行技术专业教学和研究的骨干教师以及航空公司的业务骨干合作编写了“卓越计划”飞行技术系列教材。

“卓越计划”飞行技术系列教材共20本,分别为《运输机飞行仿真技术及应用》《飞行人因工程》《机组资源管理》《飞行运营管理》《民用航空法概论》《空中交通管理基础》《飞机系统》《航空动力装置》《飞机空气动力学》《飞机飞行力学》《民航运输机飞行性能与计划》《仪表飞行程序设计原理》《航空机载电子设备》《航空气象》《空中领航》《飞行人员陆空通话》《飞行专业英语(阅读)》《飞行专业英语(听力)》《飞行基础英语(一)》《飞行基础英语(二)》等。

系列教材以理论和实践相结合作为编写的理念和原则,具有基础性、系统性、应用性等特点。在借鉴国内外相关文献资料的基础上,坚持加强基础理论,对基本概念、基础知识和



基本技能进行详细阐述,能满足飞行技术专业卓越工程师教育培养的教学目标和要求。同时,强调理论联系实际,体现“面向工业界、面向世界、面向未来”的工程教育理念,实践上海工程技术大学建设现代化特色大学的办学思想,凸显飞行技术的专业特色。

系列教材在编写过程中,参阅了大量的中外文参考书籍和文献资料,吸收和借鉴了现有部分教材的优势,参考了航空运输企业的相关材料,在此,对国内外有关作者和企业一并表示衷心的感谢。

受编者水平和时间所限,书中难免有错误和疏漏之处,敬请读者提出宝贵意见,不足之处还请同行不吝赐教。

上海工程技术大学 汪泓

2012年1月



本书根据民航飞行技术专业的培养目标,并参照了国内外同类院校本课程教学要求进行编写。希望通过本教材的学习,使读者了解航空动力装置(包括航空活塞式发动机和航空燃气涡轮发动机)的基本组成和工作原理,理解其主要性能,掌握使用中特殊情况的判断、处置和预防方法。本教材适用于民航飞行技术专业学生,也可作为机务维修、空中交通管制等其他民航相关专业学生的参考书。

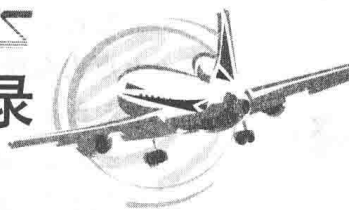
本书分为上、下篇,上篇包括3章,主要介绍航空活塞式发动机的组成、工作原理、工作系统和使用性能。下篇共有8章,主要介绍航空燃气涡轮发动机,具体包括航空燃气涡轮发动机主要类型及性能指标,涡喷发动机的部件结构和工作原理,涡喷发动机的部件共同工作及特性,涡轮风扇发动机的组成和工作特点,涡轮螺旋桨发动机和涡轮轴发动机。

本书由上海工程技术大学飞行学院吕鸿雁、郝建平主编,曹达敏老师参与了下篇第5、6章的编写工作,陈昌荣和匡江红两位老师对本书编写提供了帮助,在此一并致谢。

由于编者理论水平和实践经验有限,书中可能存在错误和不妥之处,欢迎读者批评指正。

编者

2015年5月于上海工程技术大学



## 上篇 航空活塞式发动机

<b>第 1 章 航空活塞式发动机的组成和工作原理</b> .....	3
1.1 概述 .....	3
1.2 航空活塞式发动机的分类 .....	4
1.3 航空活塞式发动机的组成 .....	4
1.3.1 基本组件 .....	4
1.3.2 工作系统 .....	6
1.4 航空活塞式发动机的理想循环 .....	7
1.5 航空活塞式发动机的基本工作原理 .....	8
1.5.1 进气冲程 .....	9
1.5.2 压缩冲程 .....	10
1.5.3 膨胀冲程 .....	11
1.5.4 排气冲程 .....	11
1.6 汽缸中的燃烧过程 .....	12
1.6.1 余气系数和油气比 .....	12
1.6.2 过贫油和过富油燃烧 .....	12
1.6.3 早燃 .....	14
1.6.4 爆震 .....	14
本章小结 .....	16
复习与思考 .....	16
阅读 .....	17
<b>第 2 章 航空活塞式发动机的工作系统</b> .....	21
2.1 燃油系统 .....	21
2.1.1 燃油系统的组成和工作 .....	21
2.1.2 直接喷射式燃油调节器的工作 .....	23



2.1.3	汽化器的工作 .....	24
2.2	点火系统和启动系统 .....	25
2.2.1	点火系统的组成和工作 .....	25
2.2.2	磁电机的工作原理 .....	26
2.2.3	磁电机的控制 .....	27
2.2.4	启动机 .....	27
2.3	滑油系统 .....	28
2.3.1	滑油系统的组成和工作原理 .....	28
2.3.2	滑油系统的监控 .....	29
2.4	散热系统 .....	30
2.4.1	散热系统的功用和分类 .....	30
2.4.2	气冷式散热系统 .....	31
2.4.3	汽缸头温度的影响因素 .....	32
	本章小结 .....	33
	复习与思考 .....	33
	阅读 .....	33
<b>第3章</b>	<b>航空活塞式发动机的性能 .....</b>	<b>37</b>
3.1	航空活塞式发动机的主要性能指标 .....	37
3.1.1	做功能力 .....	37
3.1.2	经济性 .....	38
3.2	航空活塞式发动机的使用性能 .....	38
3.2.1	发动机的综合性能曲线 .....	38
3.2.2	发动机的常见工作状态 .....	40
	本章小结 .....	41
	复习与思考 .....	41
	阅读 .....	41

## 下篇 航空燃气涡轮发动机

<b>第4章</b>	<b>航空燃气涡轮发动机主要类型及性能指标 .....</b>	<b>47</b>
4.1	概述 .....	47
4.2	燃气涡轮发动机的主要类型和截面划分 .....	48
4.2.1	燃气涡轮发动机的主要类型 .....	49
4.2.2	燃气涡轮发动机的截面划分 .....	51
4.3	燃气涡轮发动机的理想循环分析 .....	52
4.4	涡轮喷气发动机的推力产生原理 .....	53
4.4.1	推力的产生 .....	54
4.4.2	推力的计算 .....	54



4.5 燃气涡轮发动机的性能评定.....	55
4.5.1 评定燃气轮机性能的主要指标 .....	55
4.5.2 燃气涡轮发动机的效率 .....	57
本章小结 .....	58
复习与思考 .....	58
阅读 .....	59
<b>第5章 进气道 .....</b>	<b>61</b>
5.1 进气道的功用与分类.....	61
5.2 进气道的冲压压缩过程.....	62
5.3 亚音速进气道工作原理.....	64
5.4 超音速进气道.....	65
本章小结 .....	67
阅读 .....	68
<b>第6章 压气机和涡轮 .....</b>	<b>70</b>
6.1 压气机.....	70
6.1.1 压气机的功用与分类 .....	70
6.1.2 轴流式压气机的增压原理 .....	71
6.1.3 轴流式压气机特性 .....	78
6.1.4 轴流式压气机的喘振 .....	80
6.2 涡轮.....	83
6.2.1 涡轮的功用与组成 .....	83
6.2.2 燃气在涡轮中膨胀做功原理 .....	83
6.2.3 涡轮叶片断裂及预防措施 .....	87
本章小结 .....	89
阅读 .....	90
<b>第7章 燃烧基础和燃烧室 .....</b>	<b>92</b>
7.1 燃烧室的基础知识.....	92
7.2 燃烧室的工作原理.....	94
7.3 燃烧室的分类和组成.....	98
7.4 燃烧室特性 .....	101
7.5 燃烧室熄火 .....	102
本章小结.....	104
阅读.....	105
<b>第8章 排气装置.....</b>	<b>107</b>
8.1 喷管的功用和分类 .....	107



8.2	收敛形喷管的组成和工作 .....	108
8.3	收敛形喷管的三种工作状态 .....	109
8.4	反推力装置 .....	110
	本章小结 .....	112
	复习与思考 .....	112
	阅读 .....	113
<b>第 9 章</b>	<b>涡喷发动机的部件共同工作及特性 .....</b>	<b>115</b>
9.1	概述 .....	115
9.2	单转子涡喷发动机压气机与涡轮的共同工作 .....	116
9.2.1	稳定工作状态下压气机和涡轮的共同工作 .....	116
9.2.2	过渡工作状态下压气机与涡轮的共同工作 .....	117
9.3	发动机的特性 .....	120
9.3.1	转速特性 .....	120
9.3.2	高度特性 .....	123
9.3.3	速度特性 .....	124
9.4	双转子涡轮喷气发动机 .....	126
9.4.1	双转子涡喷发动机的组成和工作 .....	126
9.4.2	双转子发动机的性能特点 .....	127
	本章小结 .....	128
	复习与思考 .....	129
	阅读 .....	129
<b>第 10 章</b>	<b>涡轮风扇发动机 .....</b>	<b>134</b>
10.1	涡轮风扇发动机的组成和分类 .....	134
10.2	涡轮风扇发动机的工作特点 .....	136
	本章小结 .....	140
	复习与思考 .....	140
	阅读 .....	140
<b>第 11 章</b>	<b>涡轮螺旋桨发动机和涡轮轴发动机 .....</b>	<b>143</b>
11.1	涡轮螺旋桨发动机 .....	143
11.2	涡轮轴发动机 .....	147
	本章小结 .....	148
	复习与思考 .....	149
	阅读 .....	149
	参考文献 .....	154



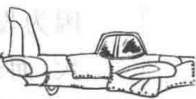
ARTICLE

上篇



# 航空活塞式发动机





# 航空活塞式发动机的组成和工作原理

## 本章关键词

航空活塞式发动机(aviation piston engine)	汽缸(cylinder)
活塞(piston)	四冲程(four stroke)
余气系数(excess air coefficient)	早燃(preignition)
爆震(detonation)	压缩比(ratio of compression)

航空活塞式发动机是为航空器提供飞行动力的往复式内燃机,发动机带动螺旋桨等推进器旋转产生推进力。由于小功率活塞式航空发动机比燃气涡轮发动机经济,目前较多地被应用于轻型低速飞机上。

本章介绍航空活塞式发动机的分类和组成,以四冲程活塞发动机为例重点介绍吸气、压缩、膨胀和排气冲程的工作特点,并对汽缸内的正常燃烧和不正常燃烧过程进行分析。

## 1.1 概述

1903—1945年,活塞式发动机作为飞机的动力装置,占据了统治地位。在两次世界大战的推动下,活塞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10kW提高到2500kW左右,功率重量比(发动机功率与发动机的重力之比,简称功重比,计量单位是kW/daN)从0.11kW/daN提高到1.5kW/daN\*,飞行高度达15000m,飞行速度从16km/h提高到近800km/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1120kW,用于“飓风”“喷火”和“野马”战斗机;美国普拉特·惠特尼公司(以下简称普惠公司)的“黄蜂”系列星型气冷发动机,汽缸7~28个,功率970~2500kW,广泛用于各种战斗机、轰炸机和运输机。

带螺旋桨的活塞式发动机的最大缺点是飞行速度受到限制(800km/h以下)。一方面,

\* \* 注:行业内以daN表示10N。

因为发动机需用功率与飞行速度三次方成正比,随着速度的提高,所需发动机功率急剧增大,而通过增加汽缸数目来增大功率所带来的重量负荷飞机不能承受;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,为实现高速飞行,必须寻求新的动力装置,这就是喷气发动机。

第二次世界大战以后,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,但小功率的活塞式发动机还在初级教练机、小型公务机、农林机、运动机、无人机和直升机上继续使用。

## 1.2 航空活塞式发动机的分类

为了适应不同用途飞机的需要,航空活塞式发动机有各种不同的类型。

按汽缸的冷却方式发动机分为液冷式和气冷式两种。早期飞机的飞行速度很低,多采用液冷式发动机。随着飞行速度的提高,可以利用高速气流直接冷却汽缸,气冷式发动机遂得到广泛应用。

按供油方式不同又将发动机分为汽化器式和直接注油式两种,其中直接注油式应用较广泛。

按气体进入汽缸前是否增压,分为吸气式和增压式两种。

按汽缸排列形式又分为星型和直列式。星型发动机汽缸以曲轴为中心沿机匣向外呈辐射状均匀排列,如图 1.1(a)所示,最常见的星型发动机有单排和双排两种形式。直列式发动机汽缸沿机匣前后成行排列,最常见的直列式发动机为水平对置型,如图 1.1(b)所示,此外,还有直立式、V 型等排列形式。

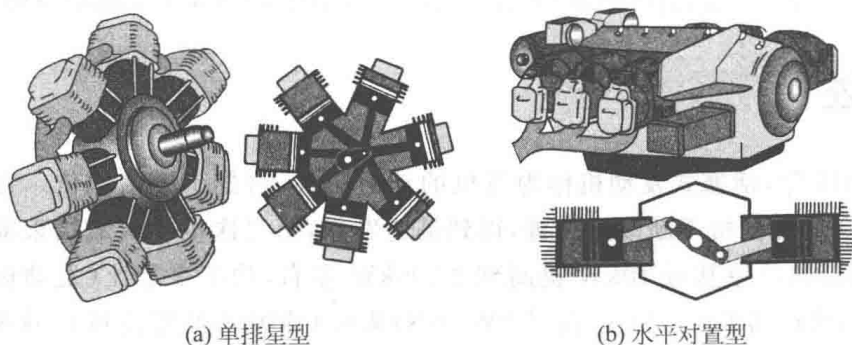


图 1.1 汽缸排列的不同形式

## 1.3 航空活塞式发动机的组成

航空活塞式发动机由基本组件和工作系统两部分组成。

### 1.3.1 基本组件

如图 1.2 所示,航空活塞式发动机的基本组件包括汽缸、活塞、连杆、曲轴、气门机构和机匣等。



## 1. 汽缸

汽缸是燃油和空气组成的混合气进行燃烧的地方,将燃烧后产生的热能转变为机械能。发动机工作时,汽缸承受燃气高温、高压的作用,因此汽缸必须要有足够的强度及良好的散热性能。汽缸一般由汽缸头和汽缸身两部分组成(见图 1.3),汽缸头上装有进气门、排气门和电嘴等部件。为了加强散热,航空活塞式发动机的汽缸头和汽缸身上都装有许多散热片。此外,为了减轻活塞高速往复运动而产生的摩擦和磨损,汽缸身内表面经过了仔细研磨抛光处理。

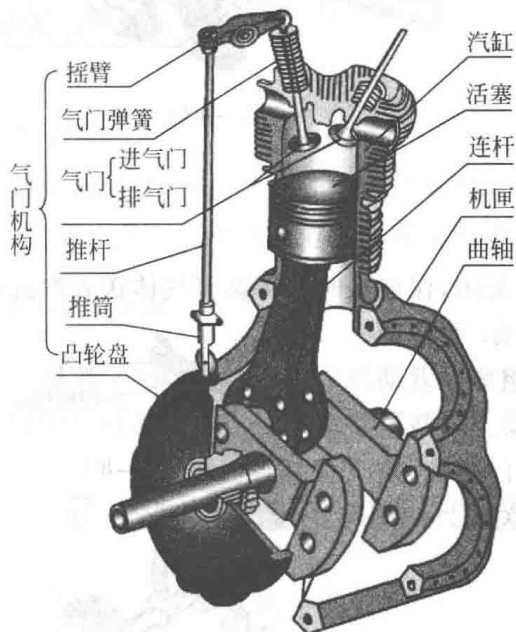


图 1.2 活塞式发动机基本组件

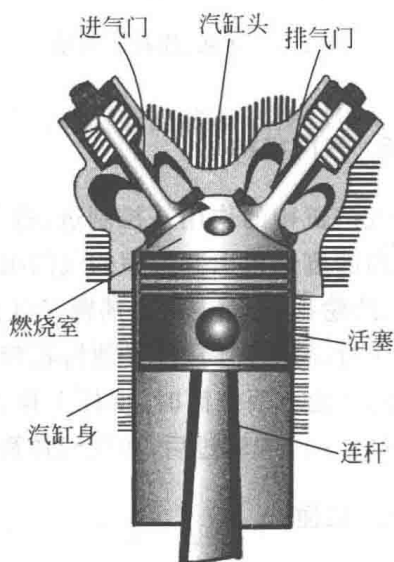


图 1.3 汽缸

## 2. 活塞

活塞在汽缸内作往复直线运动,实现气体能量与曲轴的机械功之间的相互转换。活塞上装有弹性涨圈,涨圈与汽缸抛光内表面紧密贴合,用来防止燃气漏入机匣和滑油漏进汽缸,起到密封和润滑的作用。

## 3. 连杆

连杆用来连接活塞与曲轴,传递机械功。当活塞运动时通过连杆的传动,使曲轴旋转。如图 1.4 所示。

## 4. 曲轴

曲轴支承在机匣内,它的功用是把活塞的直线运动转换为曲轴的旋转运动,以带动螺旋桨旋转和其他附件工作。曲轴的组成如图 1.5 所示,其中曲轴上的配重用来平衡曲轴转动的惯性离心力,减轻发动机工作时的振动,同时储备能量,以利于发动机的平稳工作。活塞、连杆和曲轴合称为曲拐机构。