

通用航空发动机原理与构造

董彦非 主编

TONGYONG HANGKONG FADONGJI

YUANLI YU GOUZAO



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

通用航空发动机原理与构造

董彦非 主编

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书根据通用航空发动机发展的趋势和特点,以非飞行器动力专业学习航空发动机知识为目标,全面系统地讲述了通用航空发动机中活塞式和燃气涡轮发动机的原理和基本构造,以及控制器、仪表以及发动机试验等内容。

本书可作为高等院校飞行器类专业以及涉航各专业的教材,也可供研究人员、工程技术人员及有关管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

通用航空发动机原理与构造 / 董彦非主编. -- 北京 :
北京航空航天大学出版社, 2017. 8
ISBN 978 - 7 - 5124 - 2480 - 7

I. ①通… II. ①董… III. ①航空发动机—理论—高等学校—教材②航空发动机—构造—高等学校—教材
IV. ①V23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 182943 号

版权所有,侵权必究。

通用航空发动机原理与构造

董彦非 主编

责任编辑 张艳学

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316936

北京时代华都印刷有限公司 印装 各地书店经销

*

开本:787×1 092 1/16 印张:14.75 字数:378 千字

2018 年 2 月第 1 版 2018 年 2 月第 1 次印刷 印数:2 000 册

ISBN 978 - 7 - 5124 - 2480 - 7 定价:38.00 元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

前 言

国务院印发的《中国制造 2025》以及 2016 年国务院办公厅印发的《关于促进通用航空业发展的指导意见》对大力发展通用航空业作出了部署,并提出到 2020 年,通用航空器研发制造水平和自主化率有较大提升,国产通用航空器在通用航空机队中的比例明显提高,通用航空业经济规模超过 1 万亿元,初步形成安全、有序、协调的发展格局。作为通用航空核心之一的航空发动机也将随着通用航空产业的蓬勃发展,迎来新的发展机遇,前景广阔。

通用航空发动机有自己的发展特点。例如,活塞发动机在通用航空发动机中占统治地位;通用航空发动机使用类型最全面,从活塞、涡喷、涡扇、涡桨、涡轴乃至桨扇发动机等都是通用航空飞机选用的对象;从尺寸或者推力(功率)大小上看,通用航空发动机以中小型发动机为主。

长期以来,涉航的非飞行器动力专业一直没有一本能够全面讲解航空发动机原理和构造的教材。针对飞行器动力工程专业编写的教材,一是难度大,往往需要大量的前导知识才能学懂;二是深度深,超出非本专业学生需要;三是教材分散,所需学习的内容往往分布在多种不同侧重的教材中。此外,专业性强的教材往往可读性较差。为此,我们以非飞行器动力专业为主要对象,基于通用航空发展的趋势和特点,编写了这本教材。本教材具有以下两个特点:

1. 全面 涉及的航空发动机类型包括活塞式和燃气涡轮(涡喷、涡扇、涡桨、涡轴),内容包括原理和构造,囊括了非本专业学生所需掌握的全部航空发动机内容;

2. 易懂 教材面向非飞行器动力专业,不需要前导知识,图文并茂,容易理解,可读性较强。

本书共分 10 章,由董彦非主编、统稿,其中董彦非编写第 1 章、第 6 章(6.2 节)、第 9 章(9.1 和 9.2 节)、第 10 章;薛倩编写第 4 章、第 5 章、第 6 章(6.1 节);王蕾编写第 2 章、第 3 章;杜砾编写第 7 章、第 9 章(9.3 节);马鹏飞编写第 8 章;

刘思佳编写第6章(6.3节)。此外,黄明同学参与了部分章节资料收集整理和绘图工作。

本书的出版得到了通用航空工程技术中心基金资助,编写过程中参考了大量书籍、论文和网络资料,在此,谨对相关作者深表谢意。限于编著人员水平有限,书中不妥之处,敬请读者批评指正(China_DYF@sina.com)。

编者

2018年1月

目 录

第 1 章 通用航空发动机概述	1
1.1 通用航空飞机及其发动机类型	1
1.2 通用航空发动机的发展	3
1.2.1 开创飞行纪元的活塞式发动机	3
1.2.2 航空燃气涡轮发动机发展壮大	7
1.2.3 通用航空发动机发展展望	17
1.3 通用航空发动机的应用	18
1.3.1 活塞发动机占比最高	18
1.3.2 不同类型燃气涡轮发动机的适用范围	19
思考题	20
第 2 章 航空活塞式发动机工作原理	21
2.1 航空活塞式发动机的分类	21
2.2 基本工作原理	24
2.2.1 基本概念	24
2.2.2 四行程发动机工作原理	25
2.2.3 二行程发动机工作原理	26
2.2.4 奥托循环与狄塞尔循环	27
2.3 增压式发动机	28
2.3.1 增压器的作用	28
2.3.2 增压器的分类	29
2.4 航空活塞式发动机性能参数	31
2.4.1 发动机的功率	31
2.4.2 发动机的经济性指标	33
2.4.3 其他性能参数	34
2.5 螺旋桨	35
2.5.1 螺旋桨的结构	35
2.5.2 螺旋桨的运动特性	36
2.5.3 螺旋桨的拉力和效率	37

2.5.4 变距螺旋桨·····	38
思考题·····	38
第3章 航空活塞式发动机构造 ·····	40
3.1 航空活塞式发动机的主要机件·····	40
3.2 汽缸活塞组件·····	41
3.2.1 汽缸工作条件与构造·····	41
3.2.2 活塞工作条件与构造·····	44
3.2.3 活塞销与涨圈·····	45
3.3 连杆·····	46
3.4 曲柄·····	47
3.5 机匣·····	49
3.5.1 机匣的工作条件·····	49
3.5.2 机匣的构造·····	49
3.6 气门机构·····	50
3.7 减速器·····	52
3.8 航空活塞式发动机的附件系统·····	53
3.8.1 燃油系统·····	53
3.8.2 起动系统·····	54
3.8.3 点火系统·····	55
3.8.4 润滑系统·····	56
3.8.5 冷却系统·····	57
思考题·····	59
第4章 航空燃气涡轮发动机工作原理 ·····	60
4.1 航空燃气涡轮发动机的分类·····	61
4.1.1 涡轮喷气发动机·····	62
4.1.2 涡轮风扇发动机·····	63
4.1.3 涡轮螺旋桨发动机·····	64
4.1.4 涡轮轴发动机·····	64
4.1.5 桨扇发动机·····	64
4.2 航空燃气涡轮发动机的基本工作原理·····	66
4.2.1 发动机的站位·····	66
4.2.2 推力计算·····	67
4.2.3 热力循环过程·····	68
4.2.4 能量转换与效率·····	71
4.2.5 燃气涡轮发动机的性能指标·····	72
4.3 航空燃气轮机部件共同工作及特性·····	73
4.3.1 单轴涡轮喷气发动机共同工作及特性·····	73

4.3.2 双轴涡轮喷气发动机共同工作及特性	76
习 题	78
思考题	78
第5章 航空燃气涡轮发动机构造	79
5.1 航空燃气涡轮发动机的主要部件	79
5.1.1 进气道	79
5.1.2 压气机	83
5.1.3 燃烧室	88
5.1.4 涡轮	92
5.1.5 尾喷管	95
5.1.6 加力燃烧室	97
5.2 航空燃气涡轮发动机的工作系统	99
5.2.1 空气系统	99
5.2.2 燃油系统	102
5.2.3 起动点火系统	104
5.2.4 滑油系统	107
思考题	110
第6章 典型燃气涡轮发动机的原理与构造	111
6.1 涡轮风扇发动机	111
6.1.1 涡扇发动机的分类与组成	113
6.1.2 涡扇发动机的基本工作原理	114
6.1.3 涡扇发动机的构造	116
6.2 涡轮螺旋桨发动机	120
6.2.1 涡轮螺旋桨发动机工作原理	120
6.2.2 涡轮螺旋桨发动机的组成与分类	123
6.2.3 涡轮螺旋桨发动机特性	128
6.3 涡轮轴发动机	131
6.3.1 涡轮轴发动机分类与组成	131
6.3.2 涡轮轴发动机的基本工作原理	132
6.3.3 涡轮轴发动机的构造	134
习 题	138
思考题	138
第7章 航空发动机控制器与仪表	140
7.1 航空发动机控制系统	140
7.1.1 航空发动机对控制的要求	140
7.1.2 航空发动机控制系统的任务	141

7.1.3	发动机控制的基本概念	142
7.1.4	液压机械式发动机控制系统	145
7.1.5	航空发动机电子控制器	150
7.1.6	全权限数字式电子控制系统	151
7.2	航空发动机仪表	155
7.2.1	发动机推力表	157
7.2.2	发动机扭矩计	159
7.2.3	发动机转速表	159
7.2.4	涡轮燃气温度表	161
7.2.5	滑油温度表和压力表	163
7.2.6	燃油温度表和压力表	163
7.2.7	燃油流量表	163
7.2.8	发动机振动指示器	164
7.2.9	警告系统	165
	思考题	165
第 8 章	其他类型发动机简介	166
8.1	多(全)电发动机	166
8.1.1	多电发动机的结构组成	166
8.1.2	多电发动机的主要技术与优点	168
8.2	冲压发动机	169
8.2.1	冲压发动机的类型	170
8.2.2	超燃冲压发动机	172
8.3	脉冲爆震发动机	176
8.3.1	脉冲爆震发动机的概念	176
8.3.2	脉冲爆震发动机基本工作循环	177
8.3.3	脉冲爆震发动机的潜在优点	177
8.4	组合式发动机	178
	思考题	179
第 9 章	航空涡轮发动机试验与仿真	180
9.1	航空涡轮发动机试验概述	180
9.1.1	航空涡轮发动机试验的目的和分类	180
9.1.2	航空涡轮发动机试验技术体系	181
9.2	试验内容与设备	182
9.2.1	零部件试验	182
9.2.2	整机地面试验	186
9.2.3	整机高空模拟试验	187
9.2.4	环境与吞咽试验	187

9.2.5 飞行试验	189
9.3 推进系统数值仿真	190
9.3.1 航空发动机数值仿真技术的发展	190
9.3.2 航空发动机半物理仿真系统实例	192
思考题	199
第 10 章 通用航空发动机机型介绍	200
10.1 活塞发动机	200
10.1.1 莱康明 360 系列	200
10.1.2 HS6	201
10.2 涡轮喷气发动机	203
10.2.1 J69	203
10.2.2 WP13F(C)	206
10.3 涡轮风扇发动机	208
10.3.1 Rolls - Royce BR725 涡轮风扇发动机	208
10.3.2 阿杜尔涡扇发动机	210
10.3.3 HF120 涡扇发动机	212
10.4 涡轮螺旋桨发动机	213
10.4.1 PT6A 涡桨发动机	213
10.4.2 WJ9	215
10.5 涡轮轴发动机	217
10.5.1 WZ8	217
10.5.2 LTS101 涡轮轴发动机	219
10.6 桨扇发动机	222
部分习题 参考答案	224
参考文献	225

第 1 章

通用航空发动机概述

1.1 通用航空飞机及其发动机类型

通用航空涵盖范围很大。2003年5月1日施行的《中华人民共和国通用航空飞行管制条例》对通用航空的定义为:除军事、警务、海关缉私飞行和公共航空运输飞行以外的航空活动,包括从事工业、农业、林业、渔业、矿业、建筑业的作业飞行和医疗卫生、抢险救灾、气象探测、海洋监测、科学实验、遥感测绘、教育训练、文化体育、旅游观光等方面的飞行活动。

从以上定义可知,通用航空是除了定期客、货航班以外的民用航空活动,其用途主要包括:公务飞行、私人 and 商用飞行驾驶执照培训、私用飞行和个人娱乐飞行、包机飞行和通勤运输、农林飞行、工业航空多用途飞行、航空应急救援、航空医疗救护、空中游览、航空运动、航空表演飞行和空中竞技、航空快递、航空城市消防等。

由于通用航空用途广泛,通用飞机的构型也千差万别。从飞机类型上可以分为固定翼飞机和旋翼飞机器(主要指直升机,多旋翼目前主要用于无人机)两大类。

为航空器提供推力(或拉力)、推动航空器前进的装置称航空动力装置或者航空推进系统。航空推进系统包括发动机、推进器(如螺旋桨和旋翼,喷气发动机既是发动机又是推进器)、进气道和排气喷管,其核心是发动机。

固定翼飞机按照发动机类型主要可以分为活塞式飞机、涡桨式飞机和喷气式飞机。直升机按照所用发动机类型可以分为活塞式直升机和涡轴式直升机。

美国通用航空制造商协会(General Aviation Manufacturers Association, GAMA)通常按照发动机类型和发动机数量对通用飞机进行分类,分别为单发活塞式、多发活塞式、涡桨式和喷气式公务机。除了少数公务机尺寸比较大以外,通用飞机多数属于中小型飞机。

按照用途分类,GAMA 将符合美国联邦航空条例(FAR)91 部的通用航空使用类型分为私人飞行、公务飞行、企业飞行、教练飞行、航空应用、航空观测、其他空中巡视类飞行、吊挂飞行、其他作业类飞行、航空观光、航空医疗救助及其他。将按照 FAR 135 部运营方式划分的通勤类和商业租用的使用类型分为飞行出租、航空旅行和航空医疗救助。

中国 2007 年 2 月 14 日起施行的《通用航空经营许可管理规定》(CCAR-135TR-R3)第五条规定,通用航空经营用途划分为甲、乙、丙和航空俱乐部四类,见表 1-1。

表 1-1 国内通用航空用途分类

分类	经营项目范围
甲类	陆上石油服务、海上石油服务、直升机机外载荷飞行、人工降水、医疗救护、航空探矿、空中游览、公务飞行、私用或商用飞行驾驶执照培训、直升机引航作业、航空器代管、出租飞行、通用航空包机飞行
乙类	航空摄影、空中广告、海洋监测、渔业飞行、气象探测、科学实验、城市消防、空中巡查
丙类	飞机播种、空中施肥、空中喷洒植物生长调节剂、空中除草、防治农林业病虫害、草原灭鼠,防治卫生害虫、航空护林、空中拍照
航空俱乐部类	使用限制类适航证的航空器和轻于空气的航空器从事私用飞行驾驶执照培训、航空运动训练飞行、航空运动表演飞行、个人娱乐飞行

由于通用航空飞机用途范围大,为满足不同需要使用的动力装置也多种多样(见图 1-1)。

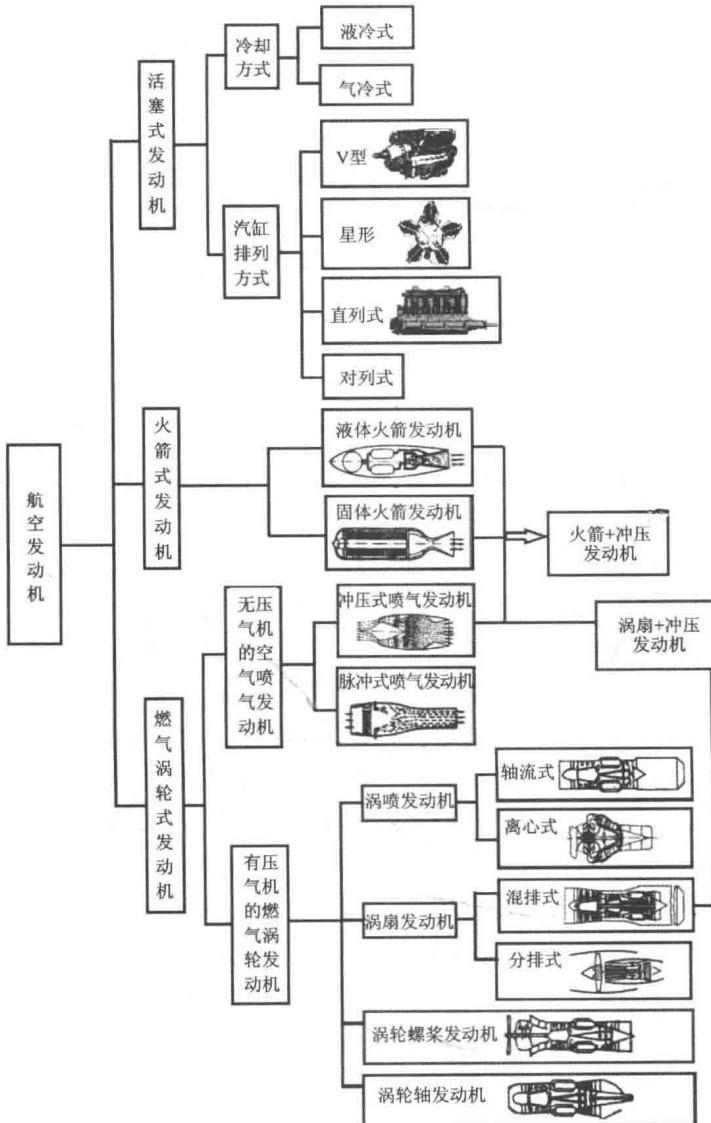


图 1-1 通用航空发动机主要类型

目前使用最多的通用航空发动机主要包括燃气涡轮发动机(包括涡轮喷气发动机、涡轮风扇发动机、涡轮螺旋桨发动机、涡轮轴发动机等)和活塞式内燃机两大类。这两类发动机都属于热机,把燃料化学能转换成机械能的设备。目前在通用飞机中使用数量占统治地位还是燃气涡轮发动机和活塞式内燃机。其他类型发动机还有火箭发动机、冲压发动机、电动机、脉冲爆震发动机以及燃料电池、太阳能等其他发动机。

1.2 通用航空发动机的发展

在人类的科技发展史中,热机经过了三次大的突破,最早是蒸汽机,属于外燃机;第二次革命是内燃机,包括汽油机和柴油发动机;第三次革命是随着人类对飞行器速度的追求,应运而生的燃气涡轮发动机。蒸汽机由于体积质量大、效率低,难以应用在航空飞行器上。

航空发动机的发展历程大概可分为两个时期。第一个时期是从莱特兄弟 1903 年 12 月 17 日的首次载人动力飞行开始到第二次世界大战末,“活塞发动机+螺旋桨”组合方式发展壮大,成为一种固定的飞机推进方式。在这个时期内,活塞式航空发动机“统治”了 40 年左右。第二个时期是从第二次世界大战结束至今,航空燃气涡轮发动机逐渐取代了活塞式发动机的霸主地位,开创了喷气时代,成为航空发动机的主流。

1.2.1 开创飞行纪元的活塞式发动机

莱特兄弟的“飞行者”一号所用的发动机出自一位普通的修理技工查尔斯·泰勒(Charles Taylor)之手。这是一台设有自动进气阀的液(水)冷、四缸、四冲程直排卧式活塞式汽油发动机(见图 1-2),汽缸内径 101.5 mm,冲程 104.8 mm,排量 3.398 L,压缩比 4.4,长期工作功率 8.95 kW,短期可达 12 kW,净质量 64 kg(无燃料),工作质量 81 kg(带燃料、水和附件),功重比约为 0.11 kW/daN。发动机通过两根链条,带动两个直径为 2.6 m 的木制螺旋桨驱动“飞行者”一号实现了人类历史上第一次有动力、载人、持续、稳定、可操作的重于空气飞行器的成功飞行。

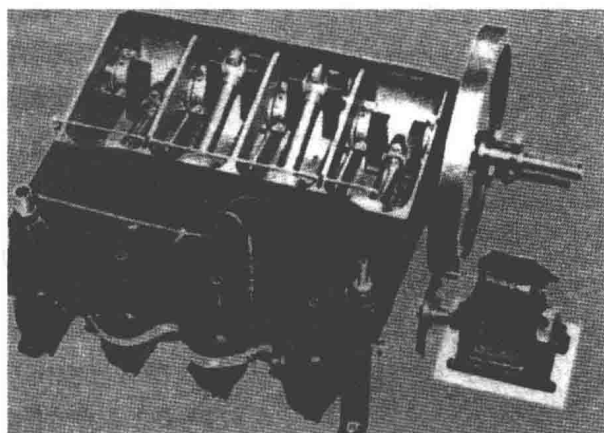


图 1-2 “飞行者”一号的活塞式汽油发动机

活塞式发动机按汽缸头的冷却方式可分为液(水)冷式和气(空气)冷式。

1. 液冷式活塞发动机

早期飞机的飞行速度很低,气冷方式实现困难,所以多采用液冷式发动机。液冷式发动机的冷却方法是在汽缸外壁面加水套,用外部循环水进行冷却。直至今日,这种方式还普遍应用在汽车、轮船用活塞发动机上。

液冷方式虽然简单有效,但必须设置一个循环冷却系统,除了水箱、水泵、空气散热器和相应的管路系统外,还要带上一箱沉重的冷却水,对于每一克质量都要斤斤计较的飞机设计师而言,无疑是弃之而后快的。但液冷式发动机迎风面积小,空气阻力也小,在整流罩技术广泛应用之前,对于追求速度的作战飞机具有很大的优势。

第一次世界大战的爆发,极大地推动了航空工业的发展。由于战争参与国主要在欧洲,所以美国虽然发明了动力飞机并且制造了第一架军用飞机,但其航空工业并不领先,而法国在当时处于领先地位。在前线的美国航空中队的6 287架飞机中有4 791架是法国飞机,如装备伊斯潘诺-西扎V型液冷发动机的“斯佩德”战斗机。这种发动机的功率已达130~220 kW,功重比为0.7 kW/daN左右,飞机速度超过200 km/h,升限6 650 m。

在两次世界大战之间,在活塞式发动机领域的几项重要发明为大幅提高发动机和飞机的性能创造了条件:

① 发动机整流罩,既减小了飞机阻力,又解决了气冷发动机的冷却困难问题,甚至可以设计两排或四排汽缸的发动机,为增加功率创造了条件;

② 废气涡轮增压器,提高了高空条件下的进气压力,改善了发动机的高空性能;

③ 变距螺旋桨,可增加螺旋桨的效率和发动机的功率输出;

④ 内充金属钠的冷却排气门,解决了排气门的过热问题;

⑤ 向汽缸内喷水和甲醇的混合液,可在短时间内增加功率1/3;

⑥ 高辛烷值燃料,提高了燃油的抗爆性,使汽缸内燃烧前压力由2~3标准大气压逐步增加到5~6标准大气压,甚至8~9标准大气压,既提高了升功率,又降低了耗油率。

由于技术的进步,气冷发动机变得越来越重要,应用也越来越广泛。但液冷发动机凭借着在空气阻力方面的优势仍然占据着一定的地位,特别是对高速战斗机来说,由于它的飞行高度高,受地面火力的威胁小,液冷发动机易损的弱点不突出,因而在许多战斗机上得到应用。

第二次世界大战期间,由于战争的推动,活塞式发动机进入发展的最高峰,同时也出现了最初的燃气涡轮发动机。在此期间,液冷发动机也得到大规模应用,例如,美国在这次大战中生产量最大的5种战斗机中有4种采用液冷发动机。其中,英国罗尔斯·罗伊斯(Rolls-Royce,简称罗·罗)公司的梅林发动机(见图1-3)1935年11月在“飓风”战斗机上首次飞行时,功率达到708 kW;1936年在“喷火”战斗机上飞行时,功率提高到783 kW。这两种二战著名战斗机的速度分别达到624 km/h和750 km/h。梅林发动机的功率在战争末期达到1 238 kW,甚至创造过1 491 kW的纪录。

美国派克(PARKER)公司按专利生产了梅林发动机,用于改装P-51“野马”战斗机,使之成为二战时最优秀的战斗机之一(见图1-4)。“野马”战斗机采用的是不常见的五叶螺旋桨,安装梅林发动机后,最大速度达到760 km/h,飞行高度为15 000 m。除具有当时最快的速度外,“野马”战斗机的另一个突出优点是惊人的远航能力,它可以把盟军的轰炸机径直护送到柏林。到战争结束时,“野马”战斗机在空战中共击落敌机4 950架,居欧洲战场的首位。在远东和太平洋战场上,由于“野马”战斗机的参战,才结束了日本“零”式战斗机的霸主地位。航空史

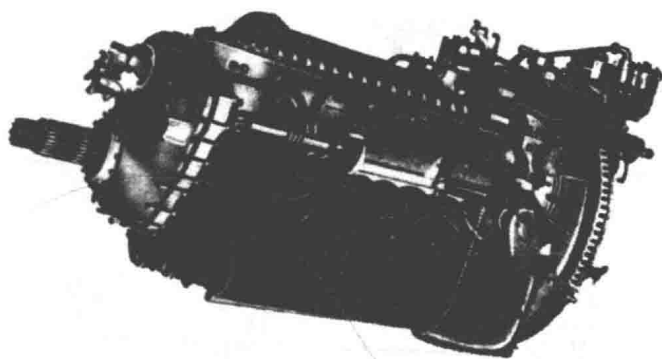


图 1-3 “梅林”12缸 V 型液冷发动机

学界把“野马”飞机看作螺旋桨战斗机的顶峰之作。

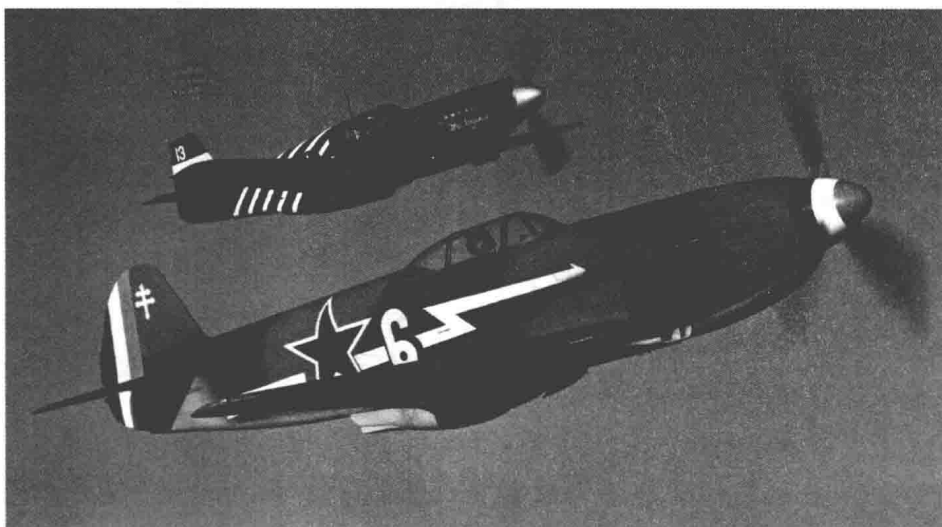


图 1-4 装备“梅林”发动机的 P-51“野马”战斗机

2. 气冷式活塞发动机

由于飞机在飞行中总有强烈气流迎面而来,用空气冷却发动机的想法自然就产生了。1908年8月22日,在法国兰斯举行了历史上首次世界航空博览会,即现在著名的巴黎航展的前身。在这次博览会上,法国人塞甘兄弟发明的旋转汽缸式发动机——“土地神”活塞发动机(见图1-5)引起了轰动。这是一台五缸星形发动机,功率达37 kW(50 马力),功重比达到0.69。这些指标是当时的液冷发动机所望尘莫及的。该发动机的最大特点是取消了飞轮和液冷装置,曲轴固定而让汽缸与螺旋桨一起转动。这种结构的发动机无论在飞行中还是在地面静止状态,都可以让汽缸得到有效的冷却,同时按奇数呈星型排列的汽缸本身还可以起到飞轮的作用,减轻了重量,使发动机运行更加平稳。

另外,该发动机暖机快、起动快,并且在汽缸外壁采用了大量薄壁散热片,外形光洁利索,迎风阻力小。这些优点使得发动机重量轻、阻力小、加速快,特别适合于战斗机使用。

这种发动机在一战中风行一时,几乎成了战斗机的标准装备,中国当时的北洋政府拨款

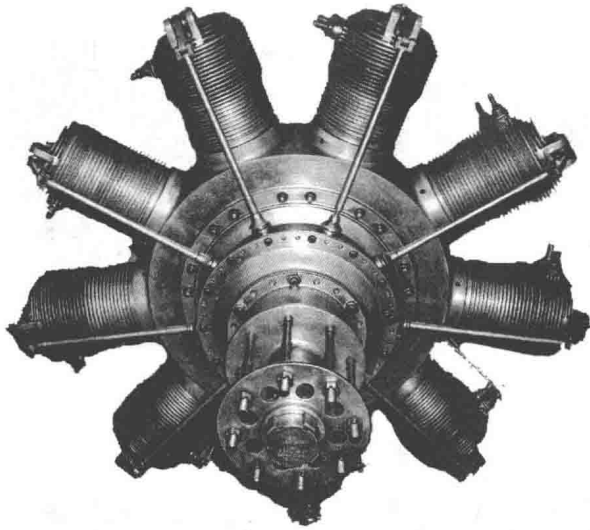


图 1-5 “土地神”星型气冷发动机

27 万元特批经费,从法国购买了 12 架装备这种发动机的“高德隆”型飞机,并参与了 1915 年反对张勋复辟的战斗,是中国最早的一次空中军事行动。

但这种发动机也有其突出的缺点:一是寿命短,一般不到 50 h;二是油耗大;三是由于汽缸数目不能太多,限制了发动机功率的增加,最大功率一般不会超过 200 kW(270 马力);四是由于汽缸质量大,旋转时会产生严重的陀螺效应,影响了飞机的操纵性能。此外,旋转汽缸发动机的润滑油易溅出,引入转动汽缸的油管易失火等。随着新型的气冷星型发动机的出现,旋转汽缸发动机在一战后逐渐被淘汰。

一战结束后,航空发动机技术得到了很大的发展。整流罩的发明解决了阻力和冷却问题,气冷星型发动机由于刚性大、重量轻、可靠性、维修性和生存性好、功率增长潜力大等优点而得到迅速发展,并开始在大中型轰炸机、运输机和地对地攻击机上取代液冷发动机。在 20 世纪 20 年代中期,美国莱特公司和普惠公司先后发展出单排的“旋风”和“飓风”以及“黄蜂”和“大黄蜂”发动机,最大功率超过 400 kW,功重比超过 1 kW/daN。到第二次世界大战爆发时,由于双排气冷星型发动机的研制成功,发动机功率已提高到 600~820 kW。此时,螺旋桨战斗机的飞行速度已超过 500 km/h,飞行高度达 10 000 m。

在第二次世界大战期间,气冷星型发动机继续向大功率方向发展,其中比较著名的有普惠公司的双排“双黄蜂”(R-2800)和四排“巨黄蜂”(R-4360)。前者在 1939 年 7 月 1 日定型,开始时功率为 1 230 kW,共发展出 5 个系列几十个改型,最后功率达到 2 088 kW,用于大量的军民两用飞机和直升机。单为 P-47 战斗机就生产了 24 000 台 R-2800 发动机(见图 1-6),其中 P-47 J 的最大速度达 805 km/h。后者有四排 28 个汽缸,排量为 71.5 L,功率为 2 200~3 000 kW,是世界上功率最大的活塞式发动机,用于一些大型轰炸机和运输机。

在第二次世界大战及战后最主要的技术进展有直接注油、涡轮组合发动机、低压点火等。在两次世界大战的推动下,发动机的性能提高很快,单机功率从不到 10 kW 增加到 2 500 kW 左右,功率重量比从 0.11 kW/daN 提高到 1.5 kW/daN 左右,升功率从每升排量几千瓦增加到四五十千瓦,耗油率从约 0.50 kg/(kW·h)降低到 0.23~0.27 kg/(kW·h),翻修寿命从

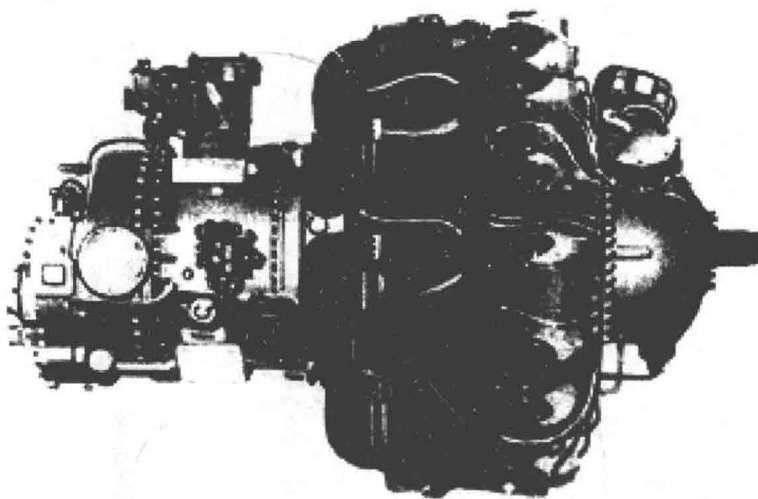


图 1-6 双黄蜂(R-2800)星型气冷发动机

几十小时延长到 2 000~3 000 h。到第二次世界大战结束时,活塞式发动机已经发展得相当成熟,以它为动力的螺旋桨飞机的飞行速度从 16 km/h 提高到近 800 km/h,飞行高度达到 15 000 m。可以说,活塞式发动机已经达到其发展的顶峰。

活塞式发动机与螺旋桨的组合,一个重要缺点就是受到飞行速度的限制。一方面,由于发动机需用的功率与飞机的飞行速度的三次方成正比,随着飞行速度的进一步提高,所需发动机功率急剧增大,活塞式发动机的重量也相应增大,通过增加汽缸数目来增大功率所带来的重量负荷飞机已经不能承受;另一方面,在飞行速度大于 700 km/h 后,螺旋桨工作不稳定,效率会急剧下降,这两方面均限制了飞行速度的提高。因此,采用活塞式航空发动机-螺旋桨组合的飞机,其飞行速度不可能达到声速。为了提高飞行速度,研制的重点转向了功率更大、重量相对更轻的燃气涡轮发动机。

随着航空燃气涡轮发动机的诞生和发展,活塞式发动机逐渐退出了航空业的主战场。但由于活塞发动机具有一定范围内油耗低、结构简单、技术成熟、价格低廉和寿命长等优点,在小功率发动机上仍有优势。目前在通用航空上活塞发动机仍然占据统治地位。

1.2.2 航空燃气涡轮发动机发展壮大

航空燃气涡轮发动机按其结构和作用原理不同,一般可分为涡轮喷气发动机(turbojet,简称涡喷发动机)、涡轮风扇发动机(turbofan,简称涡扇发动机)、涡轮螺旋桨发动机(turboprop,简称涡轮螺桨发动机或者涡桨发动机)和涡轮轴发动机(turboshaft,简称涡轴发动机)四大类,分别在各自的适用领域和时代发挥了重要作用。

1. 涡轮喷气发动机与涡轮风扇发动机

早在第二次世界大战开始前,英国的弗兰克·惠特尔和德国的汉斯·冯·奥海因就分别在 1937 年和 1938 年研制成功了离心式涡轮喷气发动机 WU 和 HeS3B。HeS3B 推力为 490 daN,推重比(发动机产生的推力与发动机自身重量之比)1.38,于 1939 年 8 月 27 日率先装在亨克尔公司的 He-178 飞机上并试飞成功,成为世界上第一架试飞成功的喷气式飞机,开创了航空推进新时代。