

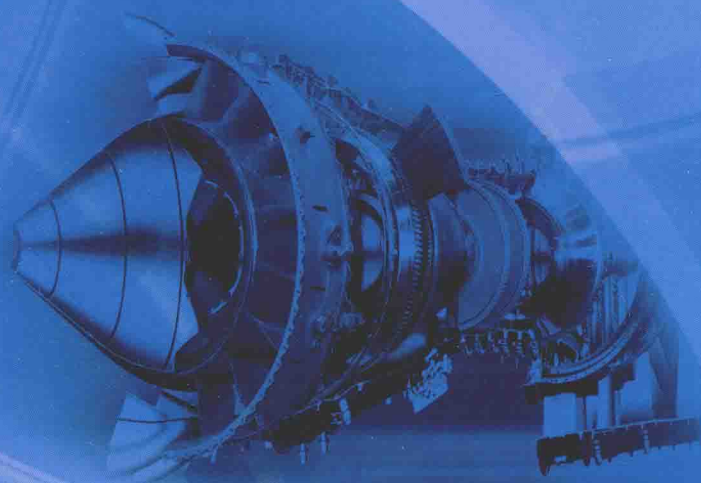


工业和信息化部“十二五”规划教材

航空发动机构造与维修管理

Hangkong Fadongji Gouzao Yu Weixiu Guanli

蔡 景 徐一鸣 孙见忠 陈志雄 刘永建 等 编著



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



工业和信息化部“十二五”规划教材

航空发动机构造与维修管理

蔡 景 徐一鸣 孙见忠 陈志雄 刘永建 等 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

内容分为10章。第1~4章主要介绍航空发动机的基本类型、发展、基本原理、结构以及主要系统。第5~10章以航空公司发动机维修人员的工作环节为主线,重点强调维修人员在实践中需要解决的问题;主要介绍航空发动机所涉及的主要监测技术,航空发动机的性能控制和可靠性控制技术,发动机故障的处理及相关的适航分析,发动机剩余寿命与调度技术,以及发动机的维修成本与送修管理。

本书可供航空发动机维修专业本科高年级学生作为教材使用,也可以作为该专业或相关专业的技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

航空发动机构造与维修管理 / 蔡景等编著. —北京 :
北京航空航天大学出版社, 2015. 6
ISBN 978-7-5124-1805-9

I. ①航… II. ①蔡… III. ①航空发动机—构造—高等学校—教材
②航空发动机—维修—高等学校—教材
IV. ①V23②V267

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 134340 号

版权所有,侵权必究。

航空发动机构造与维修管理

蔡 景 徐一鸣 孙见忠 陈志雄 刘永建 等 编著
责任编辑 张冀青 董云凤

*

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

北京兴华昌盛印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1 092 1/16 印张:20 字数:512 千字

2015 年 7 月第 1 版 2015 年 7 月第 1 次印刷 印数:2 000 册

ISBN 978-7-5124-1805-9 定价:45.00 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

航空发动机维修管理,对于保障航空器的安全性、可靠性和经济性具有重要意义,也是航空维修相关专业的重要研究内容。目前在航空发动机专业领域,已经出版发行的著作、书籍很多,如刘大响的《航空发动机:飞机的心脏》及《航空燃气涡轮发动机稳定性设计与评定技术》,张宝诚的《航空发动机可靠性和经济性》,美国普拉特·惠特尼公司的《航空燃气涡轮发动机》,童凯生的《航空涡轮发动机性能变比热计算方法》,王云的《航空发动机原理》,尚义的《航空燃气涡轮发动机》,李其汉的《航空发动机强度振动测试技术》,孔瑞莲的《航空发动机可靠性工程》,向巧的《航空发动机维修工程管理》等。以上书籍主要涉及航空发动机的设计、制造和故障诊断方面,但在维修管理方面涉及很少,因此,仅将现有发动机书籍用做发动机维修专业本科生的教材,无法使学生全面了解和掌握航空发动机维修管理所涉及的问题和知识,难以满足专业培养需求。

但苦于笔者在发动机维修的研究和实践积累有限,因而多次下笔而辍。近年来,随着我国民用飞机、发动机的研制,航空发动机使用维修的相关专业人才需求大幅度增加,因此,深感编著一本适合维修人员的航空发动机书籍是一件紧迫的事。

笔者和同仁、多位博士生、硕士生以及工程人员一起斗胆总结了国内外相关的研究,并结合团队多年的实际工程和理论研究,先后编了教学讲义,通过几年的教学实践,不断地对讲义进行修改、提高后,经过编撰人员的进一步归纳和系统化总结,提炼成本教材。因此,本教材凝聚了以往国内外发动机方面的研究成果,以及团队人员及研究生们的集体智慧。民用发动机维修领域作为一个相对新的学科,仅凭一个团队、一本书,要将民用发动机维修彻底理透彻是非常困难的,再加上笔者的能力水平有限,所以本书还存在很多不妥、粗浅的地方,敬请读者谅解。

在书稿的撰写过程中,徐一鸣老师撰写了第3章的主要内容;孙见忠老师撰写了第9章的主要内容;陈志雄老师撰写了第6章的主要内容;刘永建高级工程师参与了第6~7章的撰写。除署名作者外,左洪福教授,吴振锋、于辉、白芳、戎翔、吴静敏、朱磊、李鑫、冒慧杰、殷逸冰、吴昊博士,以及陈勇、张涛、常继百、刘宸宁、肖罗椿、朱贝蓓、陈康、陈勤富硕士,另外还有一些上面没提及的研究生直接或间接地对本书做过贡献,作者在此致以衷心的感谢。

对本书影响最大的著作是尚义的《航空燃气涡轮发动机》和王云的《航空发动机原理》,还有一些优秀著作的思想在书中也有所体现。书中个别地方直接摘录了一些优秀著作的内容,也参考了大量学术论文和资料,在参考文献中列出,但由



于时间关系,可能存在遗漏或标注错误,敬请见谅。

由于时间紧,笔者虽力求框架体系、层次结构及主要内容上的合理,但仍会存在疏漏和错误,希望读者能够给予指正,不胜感谢。

蔡 景

2014 年 12 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 航空发动机的基本类型及发展简史	1
1.1.1 航空发动机的基本类型	1
1.1.2 航空发动机的发展简史	8
1.2 世界民用航空发动机介绍	13
1.2.1 主要民用航空发动机制造商	13
1.2.2 主要民用航空发动机型号	16
1.3 现代航空发动机的发展	21
1.3.1 现代航空发动机的经济性发展趋势	21
1.3.2 现代航空发动机的降噪发展趋势	22
1.3.3 现代航空发动机的材料要求	23
1.3.4 现代航空发动机的健康管理要求	23
习题与思考题	30
第 2 章 航空发动机基本原理	31
2.1 热力学基本概念	31
2.1.1 系统、平衡态和过程	31
2.1.2 基本状态参数	32
2.1.3 理想气体的状态方程式	33
2.1.4 比热容和热量	33
2.1.5 热力学定律	36
2.2 气体动力学基本方程	37
2.2.1 气体的性质	37
2.2.2 基本方程	39
2.2.3 临界参数和速度系数	41
2.3 燃气涡轮发动机的工作原理	42
2.3.1 航空发动机的热力循环	42
2.3.2 工作循环和气流	45
2.3.3 推力的产生	48
2.4 燃气涡轮发动机的主要参数及基本要求	50
2.4.1 推 力	50
2.4.2 单位推力	51
2.4.3 推重比	51



2.4.4 单位迎面推力	51
2.4.5 单位燃油消耗率	51
2.4.6 涡轮前燃气总温	52
2.4.7 发动机排气温度	52
2.4.8 发动机的压力比	53
2.4.9 N_1 与 N_2	53
2.4.10 其他基本参数	53
2.4.11 基本要求	53
习题与思考题	54
第3章 航空发动机结构	55
3.1 进气道	55
3.1.1 亚声速进气道	55
3.1.2 超声速进气道	56
3.1.3 进气道的主要性能参数	57
3.2 压气机	59
3.2.1 离心式压气机	59
3.2.2 轴流式压气机	62
3.2.3 工作条件	66
3.2.4 材料	67
3.3 燃烧室	68
3.3.1 燃烧室的类型	68
3.3.2 燃烧过程及稳定条件	71
3.3.3 燃烧室性能	73
3.4 涡轮	75
3.4.1 涡轮介绍	75
3.4.2 涡轮组成	77
3.4.3 气体流向涡轮中的能量转移	79
3.4.4 涡轮的冷却与间隙控制	80
3.4.5 材料	81
3.5 喷管	82
3.5.1 喷管介绍	82
3.5.2 喷管的类型	83
3.5.3 涡扇发动机尾喷管	86
3.5.4 尾喷管的材料	87
习题与思考题	88
第4章 航空发动机的主要系统	89
4.1 航空发动机滑油系统	89



4.1.1 滑油系统功用	89
4.1.2 滑油系统组成	89
4.1.3 润滑系统分类	93
4.1.4 滑油指标与要求	95
4.1.5 润滑系统的常见故障	96
4.2 航空发动机空气系统	97
4.2.1 冷却与封严	97
4.2.2 空气系统控制	101
4.2.3 其他功用	102
4.3 航空发动机燃油系统	102
4.3.1 概 述	102
4.3.2 燃油控制系统	103
4.3.3 燃油系统主要机械部件	110
4.3.4 燃 油	112
4.4 航空发动机启动和点火系统	113
4.4.1 启动系统	113
4.4.2 点火系统	116
4.5 航空发动机控制系统	118
4.5.1 概 述	118
4.5.2 液压机式发动机控制系统	119
4.5.3 监控型电子控制	120
4.5.4 全权限数字电子控制(FADEC)	120
4.6 航空发动机指示系统	121
4.6.1 概 述	122
4.6.2 发动机指示系统组成	122
4.6.3 飞机综合数据系统	125
4.6.4 集中故障指示系统	125
4.7 航空发动机防冰系统	125
4.7.1 概 述	125
4.7.2 结冰部位、形式及其影响	126
4.7.3 航空发动机防冰系统	126
4.8 航空发动机防火系统	128
4.8.1 概 述	128
4.8.2 发动机火灾预防系统	128
4.8.3 发动机过热和着火探测系统	129
4.8.4 发动机着火控制系统	130
4.8.5 发动机灭火系统	130
习题与思考题	131



第 5 章 航空发动机状态监测技术	132
5.1 航空发动机状态监测概论	132
5.1.1 航空发动机状态监测发展历程	132
5.1.2 航空发动机监测技术的意义	134
5.1.3 航空发动机主要监测技术	134
5.2 航空发动机磨损状态监测技术	135
5.2.1 概 述	135
5.2.2 磨损原理	138
5.2.3 滑油磨粒铁谱分析技术	141
5.2.4 滑油磨粒光谱分析技术	143
5.2.5 滑油磁塞检测技术	144
5.3 航空发动机振动监测技术	145
5.3.1 概 述	145
5.3.2 发动机振动机理及超限的原因	145
5.3.3 振动监测系统的组成	147
5.3.4 发动机振动的测量	148
5.4 航空发动机气路监测技术	150
5.4.1 概 述	150
5.4.2 EGT 裕度降低原因	150
5.4.3 温度监测技术及其基本原理	151
5.4.4 EGT 测量方法	151
5.5 航空发动机无损检测技术	152
5.5.1 概 述	152
5.5.2 内窥检测技术	153
5.5.3 涡流检测技术	155
5.5.4 超声检测技术	156
5.5.5 渗透检测技术	157
5.5.6 磁粉检测技术	158
5.6 航空发动机静电监测技术	159
5.6.1 概 述	159
5.6.2 静电监测原理	159
5.6.3 静电监测技术应用	160
习题与思考题	161
第 6 章 航空发动机性能控制技术	162
6.1 发动机性能控制概述	162
6.1.1 发动机性能控制目标	162
6.1.2 发动机性能控制各部门职责	162



6.1.3 发动机性能控制的流程	163
6.1.4 发动机性能控制方法	164
6.2 性能数据处理	165
6.2.1 异常点分析处理	165
6.2.2 噪声处理	165
6.2.3 多源数据处理	165
6.2.4 数据的时间配准	166
6.3 发动机滑油消耗率监控技术	168
6.3.1 发动机滑油消耗率监控目标	168
6.3.2 发动机滑油消耗率监控的职责	168
6.3.3 发动机滑油消耗率监控的流程	168
6.4 发动机孔探检查控制技术	170
6.4.1 发动机孔探检查控制目标	170
6.4.2 发动机孔探检查控制的职责	170
6.4.3 发动机孔探检查控制的流程	170
6.5 发动机金属屑末控制技术	172
6.5.1 发动机金属屑末控制目标	172
6.5.2 发动机金属屑末控制的职责	172
6.5.3 发动机金属屑末控制的流程	173
6.6 发动机气路状态监控技术	174
6.6.1 发动机气路状态监控目标	174
6.6.2 发动机气路状态监控的职责	175
6.6.3 发动机气路状态监控的流程	175
6.6.4 EGTM 的计算方法	178
6.6.5 航空发动机气路分析技术	182
6.7 发动机性能恢复	190
6.7.1 发动机水洗概述	190
6.7.2 民用航空发动机水洗的意义	191
6.7.3 发动机水洗时的注意事项	193
6.7.4 影响水洗效果的因素分析	193
习题与思考题	195
第7章 航空发动机可靠性控制技术	196
7.1 发动机可靠性管理方案概述	196
7.1.1 发动机可靠性管理的职责	196
7.1.2 发动机可靠性管理的技术内容	197
7.1.3 发动机可靠性管理协同工作架构	198
7.2 发动机可靠性数据的采集	200
7.2.1 发动机可靠性指标	200



7.2.2 发动机可靠性数据来源及要求	201
7.2.3 发动机数据采集过程	202
7.3 发动机可靠性控制	204
7.3.1 警告值管理	205
7.3.2 故障事件管理	208
7.4 发动机时寿件管理	210
7.4.1 发动机时寿件概念及判定	210
7.4.2 发动机时寿件控制	211
7.5 可靠性信息的发布	214
7.5.1 发动机可靠性报告	214
7.5.2 发动机性能报告	215
7.5.3 可靠性报告要求	216
习题与思考题	217
第8章 航空发动机故障及适航分析	218
8.1 航空发动机典型故障类别	218
8.2 航空发动机实时诊断框架及数据流	221
8.2.1 航空发动机实时故障诊断系统框架	221
8.2.2 航空发动机诊断数据流程	222
8.3 航空发动机诊断基本方法	223
8.4 航空发动机持续适航要求	224
8.4.1 持续适航监察管理	224
8.4.2 使用困难报告	227
8.4.3 缺陷和不适航状况报告	231
8.4.4 重要修理及改装	231
8.5 航空发动机典型故障事例的适航分析与预防	233
8.5.1 航空发动机适航要求	233
8.5.2 航空发动机故障事例与适航分析	238
8.5.3 航空发动机故障预防	241
习题与思考题	242
第9章 航空发动机剩余寿命与下发管理	243
9.1 航空发动机剩余寿命预测技术	243
9.1.1 剩余寿命预测概念	243
9.1.2 剩余寿命预测方法与模型介绍	244
9.1.3 数据驱动的预测算例——发动机在翼寿命预测	248
9.1.4 基于模型的预测算例——疲劳裂纹扩展寿命预测	252
9.2 发动机性能排队	255
9.2.1 民航发动机性能排队的必要性	255



9.2.2 民航发动机性能排队参数	256
9.2.3 民航发动机性能排队规则	257
9.2.4 民航发动机性能排队实例分析	259
9.3 发动机下发预测	261
9.3.1 影响发动机下发的因素	261
9.3.2 发动机下发预测的方法	266
9.3.3 民航发动机下发的实例分析	267
9.4 发动机机队调度计划	269
9.4.1 发动机备发量的确定方法	269
9.4.2 发动机机队调度	271
9.4.3 发动机机队调度软件	273
习题与思考题	275
第 10 章 航空发动机维修成本与送修管理	276
10.1 发动机维修成本构成	276
10.1.1 民航发动机维修工作	276
10.1.2 发动机维修成本组成	277
10.2 航空发动机维修成本的影响因素分析	279
10.2.1 EGT 对维修成本的影响	279
10.2.2 滑油性能对维修成本的影响	279
10.2.3 维修等级与修理决策对维修成本的影响	279
10.2.4 起飞推力对维修成本的影响	280
10.2.5 航材管理对维修成本的影响	281
10.2.6 物理环境对维修成本的影响	282
10.3 航空发动机维修成本控制	283
10.3.1 发动机维修成本控制手段	283
10.3.2 发动机送修成本的核算	284
10.3.3 机群维修保障成本评估模型	288
10.4 航空发动机维修等级的划分及影响因素	290
10.4.1 送修维修等级划分	290
10.4.2 送修等级影响因素分析	292
10.5 送修等级决策规则	296
10.5.1 MPG 的介绍	296
10.5.2 送修等级判定	298
10.6 发动机送修工作包	299
10.6.1 送修工作包的结构组成	299
10.6.2 送修工作包的制定过程	301
习题与思考题	301
参 考 文 献	302

第 1 章 绪 论

1.1 航空发动机的基本类型及发展简史

1.1.1 航空发动机的基本类型

航空发动机自诞生以来,经过一百多年的发展,主要分成了两大类:活塞式发动机和燃气涡轮发动机,如图 1.1 所示。

活塞式发动机是通过在密闭的容器内将燃油与空气混合、燃烧释放出热能,然后膨胀对连杆等做功的机械装置。活塞式发动机上安装螺旋桨,并由螺旋桨产生推(拉)力。所以,作为飞机的动力装置时,活塞式发动机与螺旋桨是不能分割的。活塞式发动机根据完成一次做功所需要的活塞行程数,可分为两类:二行程活塞发动机和四行程活塞发动机。所谓一个行程,是指发动机活塞从上止点运行到下止点之间的距离,如图 1.2 所示。因此二行程活塞发动机需要活塞往复两个行程完成一个做功循环,而四行程活塞发动机需要活塞往复四个行程完成一个做功循环。

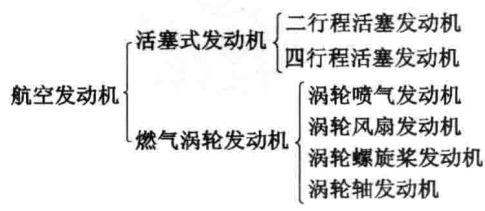


图 1.1 航空发动机分类

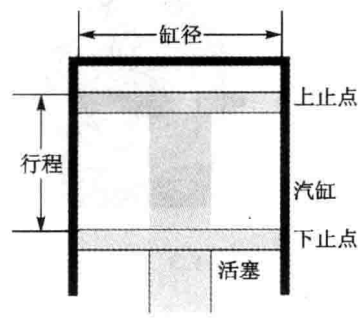


图 1.2 活塞行程

航空燃气涡轮发动机是将燃油燃烧释放出的热能转变为机械能和动能的装置,经过多年的发展和应用实践,已经形成多种不同类型的涡轮发动机。按照不同的飞行领域和推力产生特点,主要分为涡轮喷气、涡轮风扇、涡轮螺旋桨和涡轮轴发动机。

所有的涡轮发动机都包含压气机、燃烧室、涡轮 3 大部分。压气机利用高速旋转的叶片对空气做功,提升气体压力;气体进入燃烧室后与喷嘴喷出的燃料混合,然后在燃烧室内混合燃料的气流燃烧;燃烧后产生的高温气体膨胀将直接推动涡轮使其旋转;最后气体带着剩余的能量经喷管排出。

1. 活塞式发动机

活塞式发动机的主要组成部件有连杆、曲轴、活塞、汽缸、分气机构和机匣等。发动机前部



有减速器,以降低输出轴的转速。为了提高发动机的高空性能,大多数发动机在机匣后部位置上装有增压器。

(1) 四行程活塞式发动机工作原理

四行程活塞式发动机在四个行程内要完成:进气、压缩、做功、排气 4 个过程,活塞在一个行程内只进行一个过程,因此,活塞行程分别由 4 个过程命名。

1) 进气行程

进气行程中,进气门处于开启状态,排气门处于关闭状态,如图 1.3 所示。活塞从上向下移动过程中,空气经进气管被吸入并与喷油器喷出的燃油以一定比例混合,当活塞到达下止点时,进、排气门均关闭,进气停止,即进气行程结束。

2) 压缩行程

进气行程结束后,曲轴通过连杆继续带动活塞从下向上移动,此时进、排气门均关闭,随着活塞的移动,缸内可燃混合气被压缩,其压力和温度同时升高,当活塞移动到上止点时压缩行程结束,如图 1.4 所示。

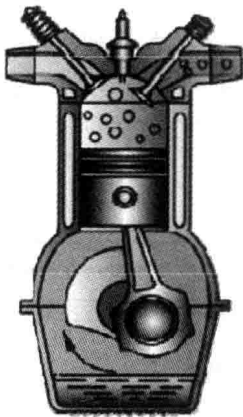


图 1.3 进气行程

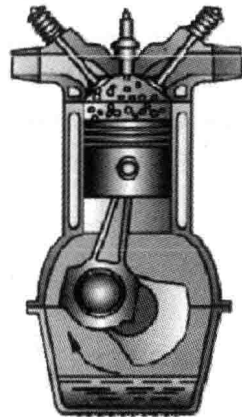


图 1.4 压缩行程

3) 做功行程

当活塞在压缩行程接近上止点时,由火花塞产生电火花,点燃缸内可燃混合气。混合气燃烧产生大量的热量并急剧膨胀,温度和压力迅速升高,迫使活塞由上向下移动,并通过连杆推动曲轴旋转而将热能转化为向外输出机械功。当活塞到达下止点时,做功行程结束,如图 1.5 所示。

4) 排气行程

做功行程结束之后,进气门便处于关闭状态,排气行程开始。由于惯性的作用,飞轮将继续转动并通过连杆带动活塞由下向上移动,将燃烧后的废气经排气门排出。当活塞到达上止点时,排气行程结束,排气门关闭,如图 1.6 所示。

根据其排列方式的不同,汽缸可以分成 4 种:直列式、V 形、对置式和星形。

① 直列式。发动机的各个汽缸按照一列排列,如图 1.7 所示。直列式发动机汽缸具有稳定、成本低、结构简单等优点,而且运转平衡性好,在低速时扭转特性好,燃料消耗也少。其缺



点是发动机的长度会因为排气量和汽缸数增加而大大增加,这就使得多缸情况下直列式适应性差,因此该形式不适合6缸以上的发动机采用。

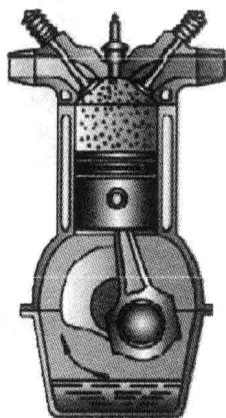


图 1.5 做功行程

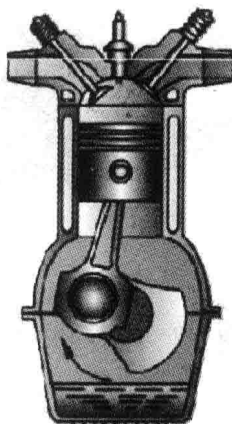


图 1.6 排气行程

② V形。V形发动机的汽缸形式是排成两列,左右两列汽缸中心线的夹角如图1.8所示。V形发动机与直列式发动机相比,缩短了机体长度和高度,增加了汽缸体的刚度,减轻了发动机的质量,但缺点是使得发动机的宽度增加,并且形状也比较复杂,加工困难,一般用于8缸以上的发动机,目前6缸发动机也有采用这种形式的汽缸体。

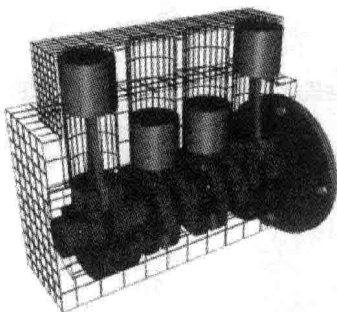


图 1.7 直列式发动机

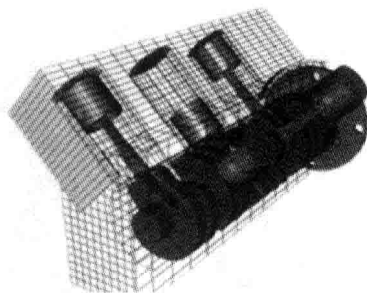


图 1.8 V形发动机

③ 对置式。对置式发动机的汽缸排成两列,左右两列汽缸布置在在同一水平面上,如图1.9所示。对置式发动机的特点是可以有效降低发动机舱的高度,降低重心,并且非常有效地避免了振动,而且对置式发动机总体布置方便,有利于风冷。

④ 星形。星形发动机的汽缸以曲轴为中心沿机匣向外呈辐射状均匀排列,汽缸个数一般为奇数,通常有单排、双排等形式,如图1.10所示。星形发动机内汽缸的活塞按一定的顺序逐个做往复运动,连杆连接活塞和曲轴,其内部运动形式由活塞的往复运动变成了轴的旋转运动。

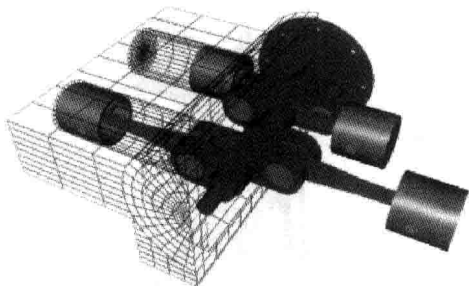


图 1.9 对置式发动机

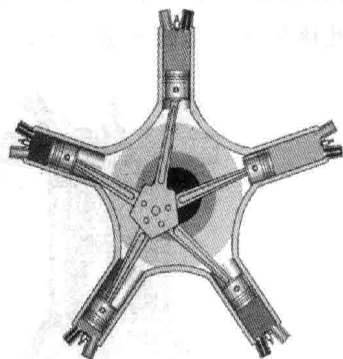
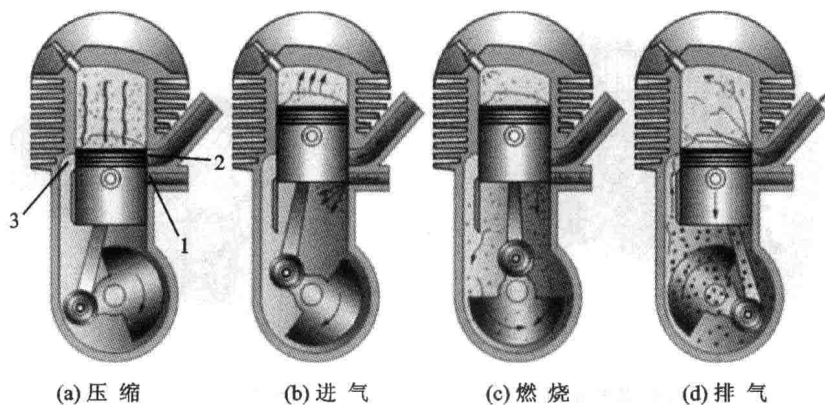


图 1.10 星形发动机

(2) 二行程活塞式发动机工作原理

二行程活塞发动机同样具有四行程发动机的 4 个过程,即进气、压缩、做功和排气过程,不过这些过程只通过两个行程就可以完成,如图 1.11 所示。二行程活塞式发动机的最大特点是换气过程,首先排气口打开,进行排气过程,然后扫气口开启,具有一定压力的新鲜充量由扫气口流入汽缸,并强迫废气由排气口流出,进行充量更换,然后,活塞到达下止点后又上行,在压缩行程的开始之后,依次将扫气口和排气口关闭,换气过程结束。新鲜充量通过扫气泵提供,在经过压缩之后其压力会提高,再引入汽缸。



1—进气孔;2—排气孔;3—扫气孔
图 1.11 二行程活塞式发动机工作原理

二行程活塞发动机换气过程的特点:

- 换气时间比其他的短,换气质量相对较差,因为有一部分新鲜充量在扫气期间经过排气口时直接流入到排气管中,新鲜充量损失较大。
- 进排气两个过程是同时进行的,因此新鲜充量与废气易于掺混,残余废气系数较大。
- 与四行程活塞发动机相比,扫气消耗量大,燃油消耗率高。
- 碳氢化合物排放高。

相对于四行程活塞发动机,二行程活塞发动机不需要气门,大大简化了结构,减轻了自身



的质量,而且便于维护。二行程活塞发动机汽缸上曲柄旋转 360° 就能做功一次,而四行程活塞发动机上则需旋转 720° 做功一次。这些特点使得二行程发动机能输出较大功率的同时保持轻便的体积和质量。因此,通常二行程活塞发动机主要用于对推重比要求较高的小型机械。

四行程活塞发动机中有缸顶气门控制进排气工作,4个行程各自单独进行,发动机运转稳定,燃气的利用率高,排出的废气较为清洁;混合气中不需要再加入机油润滑,而曲轴箱内的小机油泵将负责润滑工作,这有效避免了机油进入汽缸内燃烧。而四行程活塞式发动机的缺点是气门复杂,质量大。

(3) 活塞式发动机应用范围

20世纪30年代,活塞式发动机在飞机上的应用极为广泛,活塞式发动机搭配螺旋桨的组合形式成为一种固定的推进模式广泛应用于飞机上,如各种战斗机、轰炸机和运输机。20世纪40年代开始,由于螺旋桨自身的特性导致其不能满足飞机速度和高度的需求,逐渐被燃气涡轮发动机替代。例如:由于发动机需要功率与飞行速度的3次方成正比,而飞机无法承受通过增加汽缸数目来增大功率所带来的质量负荷;在高度方面,螺旋桨的效率会随着飞行速度的提高而急剧下降,有机毁人亡的危险。

然而,小功率活塞式航空发动机具有比燃气涡轮发动机经济、易于维修等优点,目前在轻型低速飞机等通用航空上仍得到应用。截至2013年年底,我国通航作业的1654架飞机中,70%为活塞式发动机。据报道美国正在研制新型的二行程柴油机,并将其应用于下一代小型通航飞机上。

2. 燃气涡轮发动机

(1) 涡轮喷气发动机

涡轮喷气发动机,简称为涡喷发动机。涡轮喷气发动机在工作时,通过从前端吸入大量的空气并在燃烧后高速喷出。这样发动机向气体施加力,根据牛顿第三定律,气体也给发动机一个反作用力,并通过这个力推动飞机前进。所以,涡轮喷气发动机原理就是完全依赖燃气流产生推力而工作的。

涡轮喷气发动机是热机的一种,因此遵循在高压下输入能量,低压下释放能量的做功原则。在这一点上喷气式发动机与活塞式发动机是相同的,即都需要有进气、加压、燃烧和排气这4个阶段,并以此输出能量。在活塞发动机中,这4个过程都在同一个燃烧室内发生,分时依次进行;但是在涡轮喷气发动机内,这些功能都被划分在不同的区域中进行,气流流经不同的喷气发动机的不同部件,就完成了活塞式发动机对应的4个阶段,所有的功能都能同时运作而且不会互相干扰。

典型的涡轮喷气发动机包括进气道、压气机、燃烧室、涡轮和尾喷管这5个基本部件。空气首先进入的是发动机的进气道,在飞机飞行时,可以看做气流以飞行速度流向发动机。进气道后的压气机是专门用于提高气流的压力,空气流过压气机时,压气机工作叶片对气流做功,使气流的压力和温度升高。空气经过压气机压缩后进入燃烧室与航空煤油混合燃烧,从燃烧室流出的高温高压燃气,流过与压气机装在同一条轴上的涡轮,燃气的部分内能在涡轮中膨胀,转化为机械能并带动压气机旋转。从涡轮中流出的高温高压燃气,在尾喷管中继续膨胀,以高速沿发动机轴向从喷口向后排,其速度比气流进入发动机的速度大得多,从而使发动机获得反作用推力。整个过程如图1.12所示。

从燃烧室出来的气流温度越高,相应的输入能量就越大,发动机推力也就越大。然而由于