

# 无人机动力系统

● 主编 唐毅 王征



 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 提 要

本书根据无人机应用技术专业的培养目标编写，内容分为两个部分，第一部分为活塞发动机与涡轮发动机的相关知识，主要介绍了活塞发动机动力系统的结构组成与工作原理，涡喷、涡扇、涡桨、涡轴发动机的工作原理及结构特点；第二部分为电动无人机动力系统的相关知识，主要介绍了电动无人机动力系统的组成、各个部件的性能及结构特点，为突出实践性和实用性，编写了相关实训项目及实训工卡。

本书主要作为无人机应用技术专业无人机动力系统类课程的教材，也可供企事业单位无人机工程技术人员培训与学习使用。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目(CIP)数据

无人机动力系统 / 唐毅, 王征主编. -- 北京: 北京理工大学出版社, 2023.3  
ISBN 978-7-5763-1981-1

I. ①无… II. ①唐… ②王… III. ①无人驾驶飞机—动力系统 IV. ①V279

中国国家版本馆CIP数据核字(2023)第003549号

---

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68944723 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 河北鑫彩博图印刷有限公司

开 本 / 787毫米×1092毫米 1/16

印 张 / 12

字 数 / 286千字

版 次 / 2023年3月第1版 2023年3月第1次印刷

定 价 / 59.00元

责任编辑 / 阎少华

文案编辑 / 阎少华

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

---

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

# 前 言

无人机发展的时间并不长，但爆发的速度非常惊人，无人机动力系统作为飞行器的“心脏”，直接影响无人机的性能、成本和可靠性，也是制约未来高新技术无人机发展的瓶颈。本书立足于无人机动力系统的特点和现状，着重从动力系统的工作原理入手，选取无人机应用最为广泛的电动动力系统、活塞动力系统、涡喷动力系统三种类型的动力系统，阐述各部件的结构组成和工作原理，并匹配相关实训及工单，便于读者理解与掌握相关知识。

本书编写结合无人机实际应用需求，紧跟《国家职业教育改革实施方案》和《职业教育提质培优行动计划（2020—2023年）》等文件总体要求，聚焦“三教”改革，突出“岗课赛证融通”，对接无人机装调、无人机监测、无人机维护保养等岗位需求，融入“1+X”无人机职业技能等级标准、无人机装调检修工国家职业技能标准和无人机职业技能大赛赛项内容，以无人机动力系统的结构组成及具体应用为基点，着眼于培养适应无人机行业、企业需求的复合型、创新型、发展型的高素质技术技能人才，提升学生职业能力和职业素养。全书结合无人机组装、调试、维修岗位相关要求，介绍了活塞发动机、涡喷发动机及电动动力系统的相关工作原理，为学生从事相关工作岗位打下扎实的知识基础。书中关于活塞发动机的调试、涡喷发动机的调试、无刷电机绕组绕制、电调参数设置、电池放电测试等实训项目都是无人机组装、调试、维修岗位的日常工作内容，通过这些实训项目，使学生了解和熟悉相关岗位的日常工作内容，锻炼岗位实践技能，为毕业后从事相关工作打下扎实的技能基础。

全书共8个项目，项目1为活塞发动机的相关知识，主要介绍了活塞发动机动力系统的结构组成与工作原理，配套实训项目为活塞发动机的安装与调试，对应的是无人机技能大赛中有关无人机发动机检测维修的相关技能；项目2为涡轮发动机的相关知识，主要介绍了涡喷、涡扇、涡桨、涡轴发动机的工作原理及结构特点，配套实训项目为涡喷发动机的调试，对应的是无人机应用中关于小型涡喷发动机的组装及调试技能；项目3为电动无人机动力系统组成，主要内容为电动无人机动力系统各个部件的结构及功用，配套实训项目为电动无人机动力系统部件的识别与了解，对应的是无人机维修基本技能；项目4为无人机电机和电调的分类与结构，主要内容为无刷与有刷电机的结构，配套实训项目为2212无刷电机定子绕制，对应的是无人机动力电机的维修技能；项目5为无刷直流电机与电调的参数，主要内容为无刷电机的参数设置与调试，配套实训项目为利用BLHeliSuite软件进行电调参数设置，对应的是无人机电调的组装与调试技能；项目6为螺旋桨的参数，主要内容为螺旋桨的结构组成及参数，配套实训项目为螺旋桨的认识与了解，主要对应的是无人机组装调试基本技能；项目7为锂离子电池的相关知识，主要内容为锂离子电池的基本参数、正确使用方式等，配套实训项目为电池的放电测试，主要对应的是无人机组装调试与应用的基本技能；项目8为无人机动力系统的匹配，通过一个完整的实训项目，将前期所学知识进行融会贯通，对应无人机组装调试及应用技能。

对应的岗位、证书技能及大赛具体如下：

对应岗位	无人机组装岗位、调试岗位、维修岗位、检修岗位
对应证书技能	<p>《无人机装调检修国家职业技能标准》初级工证书：无人机动力系统日常维护</p> <p>《无人机装调检修国家职业技能标准》中级工证书：子系统装配、动力系统调试、子系统测试、检查性维保</p> <p>《无人机装调检修国家职业技能标准》高级工证书：飞行平台构型选择、布局结构选型、材料选型、动力系统选型</p> <p>《“1+X”无人机检测与维护职业技能等级标准》高级证书：无人机系统机械故障隔离与排除、电子电气故障隔离与排除</p> <p>《“1+X”无人机组装与调试职业技能等级标准》中级证书：无人机组装、无人机调试、地面测试</p> <p>《“1+X”无人机组装与调试职业技能等级标准》高级证书：无人机组装、无人机调试、地面测试</p>
对应大赛	<p>“智能战鹰”陆军无人机定向培养军事技能大赛——发动机检测维修</p> <p>全国人工智能应用技术技能大赛——无人机组装检修工赛项</p> <p>“步云航空杯”全国职业院校无人机应用创新技能大赛——无人机组装与调试</p> <p>一带一路暨金砖大赛之无人机应用技能大赛——无人机应用技术</p>

本书涵盖了无人机动力系统的工作原理及其结构与组成，学习本书后，能够达到如下目的：熟悉无人机动力系统的工作原理及使用方法；掌握无人机动力系统的调试、组装及排故方法；了解无人机动力系统的具体应用，能够根据实际应用选择合适的动力系统。

本书共分为8个项目，其中项目1、项目4、项目7和项目8由长沙航空职业技术学院唐毅编写，项目2、项目3和项目5由石家庄工程职业学院王征编写，项目6由桂林航天工业学院王广编写，长沙航空职业技术学院谢志明、刘肩山负责全书图片资源的整理与制作，张家界启航智能科技有限公司张鑫对配套实训项目进行收集及整理。

由于编者水平有限，时间比较仓促，书中难免存在不足和疏漏之处，敬请各位读者给予批评指正，以便今后修订完善。

编者



无人机动力系统概述  
(上)



无人机动力系统概述  
(下)

# 目录 Contents

## 第一部分 航空动力装置概述

### 01

#### 项目 1 航空活塞发动机概述.....2

- 1.1 航空活塞发动机的分类和组成..... 3
- 1.2 航空活塞发动机的基本工作原理 ..... 9
- 1.3 航空活塞发动机的理想循环.....13
- 1.4 二冲程往复式航空活塞发动机的工作原理.....20

### 02

#### 项目 2 航空燃气涡轮发动机 .....29

- 2.1 涡喷发动机 .....30
- 2.2 涡桨发动机 .....41
- 2.3 涡轴发动机 .....45
- 2.4 涡扇发动机 .....47

## 第二部分 电动无人机动力系统

### 03

#### 项目 3 电动无人机动力系统组成.....64

- 3.1 了解电动无人机动力系统的组成 .....65
- 3.2 认识动力电机 .....67
- 3.3 调速系统 .....71
- 3.4 动力电源 .....73
- 3.5 螺旋桨.....74

### 04

#### 项目 4 无人机电机和电调的分类与结构.....89

- 4.1 有刷直流电机与电调的结构.....90
- 4.2 无刷直流电机与电调的结构.....92
- 4.3 空心杯电机 .....94

# 05

## 项目 5 无刷直流电机与电调的参数 ..... 104

- 5.1 无刷直流电机的参数及对比 ..... 105
- 5.2 无人机电调的参数 ..... 108
- 5.3 无人机电调参数设置 ..... 111

# 06

## 项目 6 螺旋桨的参数 ..... 127

- 6.1 桨径和桨距 ..... 128
- 6.2 正、反桨 ..... 129
- 6.3 螺旋桨的材质 ..... 130
- 6.4 其他参数 ..... 132

# 07

## 项目 7 锂离子电池的相关知识 ..... 139

- 7.1 电池的分类 ..... 140
- 7.2 各种电池简介 ..... 143
- 7.3 锂电池 ..... 146
- 7.4 动力电池的充电 ..... 158
- 7.5 各种电池性能比较 ..... 161
- 7.6 正确使用与保养动力电池 ..... 161

# 08

## 项目 8 无人机动力系统的匹配 ..... 169

- 8.1 相关设备的检查与组装 ..... 170
- 8.2 电机的选择 ..... 170
- 8.3 电调的选择 ..... 172
- 8.4 桨叶的选择 ..... 173
- 8.5 电池的选择 ..... 176
- 8.6 飞机的设置 ..... 177
- 8.7 试飞 ..... 184

## 参考文献 ..... 186

第一部分

# 航空动力装置概述



# 航空活塞发动机概述



## 【知识目标】

- (1) 掌握航空活塞发动机的分类和组成；
- (2) 掌握航空活塞发动机的基本工作原理；
- (3) 掌握航空活塞发动机的理想工作过程；
- (4) 掌握航空活塞发动机的构造。



## 【能力目标】

- (1) 能分辨航空活塞发动机的各个组成部分；
- (2) 能讲述航空活塞发动机的四个工作行程。



## 【素质目标】

- (1) 具有艰苦朴素的工作作风和迎难而上的工作信念；
- (2) 具备一定的创新意识；
- (3) 养成严谨细致的工作作风。

## 【学习导航】

本项目主要学习航空活塞发动机动力系统的组成。

## 【问题导入】

航空活塞发动机出现较早，发展周期长，理论研究和实践应用方面都比较成熟和完善。直到现在，虽然出现了大功率的适用高速飞行的喷气式发动机，活塞发动机仍占有重要的地位。在飞行速度不太快的飞机上，航空活塞发动机能发扬其耗油率低、使用维护成本低的优点。因此，航空活塞发动机在轻型低速飞机上仍广泛使用。

从 1903 年世界上第一架飞机升空到第二次世界大战末期，所有飞机都用航空活塞发动机作为动力装置。20 世纪 40 年代中期，在军用和大型民用飞机上，燃气涡轮发动机虽然逐步取代了航空活塞发动机，但与燃气涡轮发动机相比，小功率航空活塞发动机比较经济，在轻型低速飞机上仍得到较普遍应用。那么：

1. 航空活塞发动机的基本结构和分类有哪些？
2. 航空活塞发动机由哪些机件组成？
3. 航空活塞发动机分为哪些工作系统？

## 1.1 航空活塞发动机的分类和组成

### 1.1.1 航空活塞发动机的分类

从基本工作原理方面的差别来看，航空活塞发动机主要有四冲程发动机和二冲程发动机两种。后一种只在过去的少数飞机上使用，目前使用的航空活塞发动机都是四冲程发动机。由于长期发展的结果，航空活塞发动机种类繁多，形式千差万别。但因航空业不断进步，有的类型已经逐渐被淘汰了，所以，对航空活塞发动机的分类仅限于目前仍广泛采用的类型。

#### 1. 按混合气形成的方式划分

根据混合气形成的方式不同，航空活塞发动机可分为汽化器式发动机和直接喷射式发动机。

(1) 汽化器式发动机(图 1-1)中装有汽化器，汽油与空气在汽化器内混合好后，再进入发动机气缸中燃烧。汽化器也称化油器，它的作用是在汽油进入发动机气缸前，将其与空气按一定的比例混合，让汽油以雾状形式进入燃烧室，以供发动机正常点火运行。

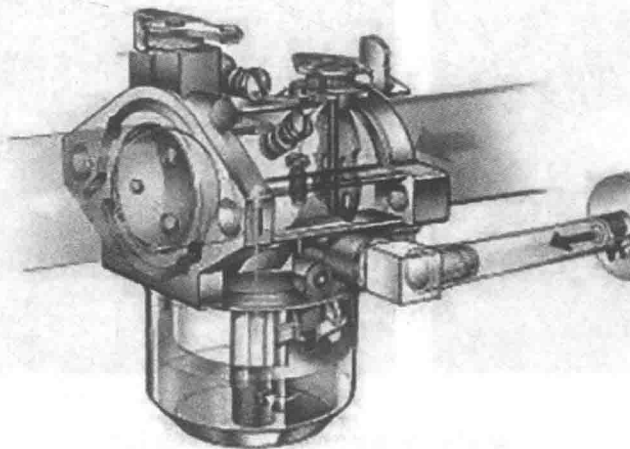


图 1-1 汽化器式发动机

(2) 直接喷射式发动机(图 1-2)中装有燃油直接喷射装置,发动机工作时,燃油由直接喷射装置直接喷入各气缸或气缸头部进气门腔室,与适量的空气在气缸内形成混合气。直喷式喷油嘴一般安装于气缸内,直接将燃油喷入气缸内与进气混合。喷射压力也进一步提高,使燃油雾化更加细致,实现了精准控制喷油比例与进气混合,使发动机的效率更高。

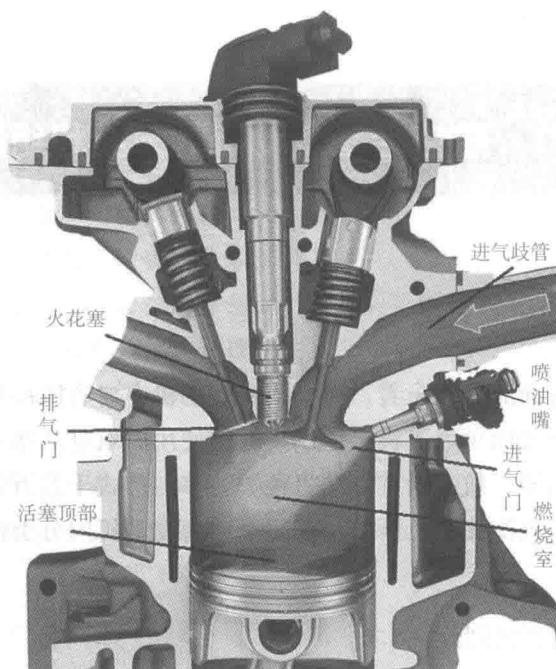
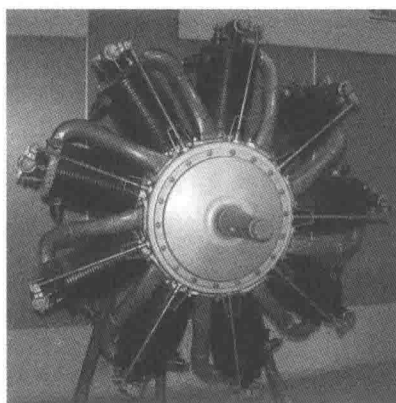


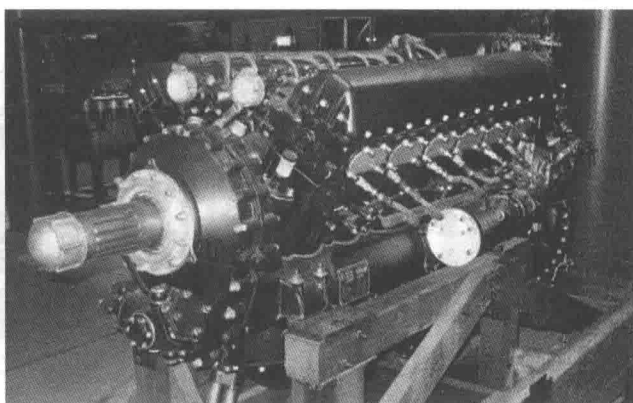
图 1-2 直接喷射式发动机

## 2. 按发动机的冷却方式划分

根据发动机的冷却方式不同,航空活塞发动机可分为气冷式发动机[图 1-3 (a)]和液冷式发动机[图 1-3 (b)]。



(a)



(b)

图 1-3 气冷式发动机和液冷式发动机

(a) 气冷式发动机; (b) 液冷式发动机

气冷式发动机直接利用飞行中的迎面气流来冷却气缸和相关部件；液冷式发动机利用循环的液体来冷却气缸和相关部件，再将冷却液所吸收的热量散入大气之中。

气冷式发动机与液冷式发动机的不同可以从以下几个方面来进行比较：

(1) 功率：从功率角度而言，两者没有太大的差异，在某种程度上液冷式发动机稍好一些，因为气冷式发动机的散热不太好。

(2) 生产难度：液冷式发动机的制作难度大，气冷式发动机相对简单。

(3) 维护性和抗损性：气冷式发动机较好，即使有几个气缸坏了，也不影响飞行员返航；液冷式发动机一旦出问题，就会导致发动机停止工作，而且液冷装置的维护非常麻烦，第二次世界大战时英国就饱受梅林发动机维护麻烦之苦。

(4) 装机的适用性：液冷式发动机可以做成V型，有助于机头形成流线，降低阻力，而且飞行员的视野比较好；气冷式发动机是星型布局的，正面面积比较大，阻力大，而且在起降时影响飞行员的视野。

### 3. 按空气进入气缸前是否增压划分

根据空气进入气缸前是否增压，航空活塞发动机可分为吸气式发动机和增压式发动机(图1-4)。

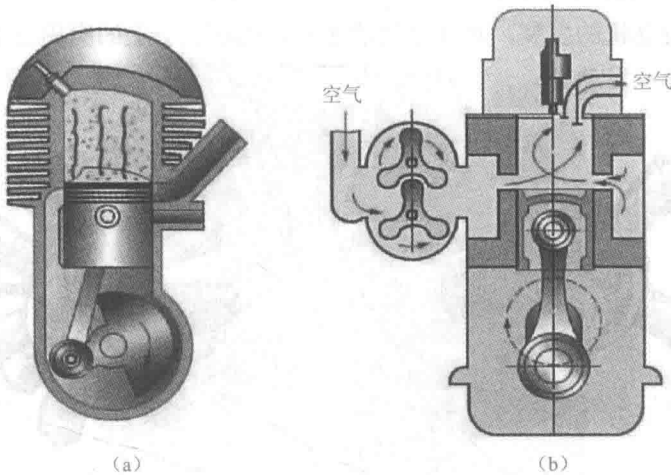


图1-4 吸气式发动机和增压式发动机

(a) 吸气式发动机；(b) 增压式发动机

吸气式发动机工作时，外界的空气被直接吸入发动机气缸。一般吸气式发动机用在飞行高度较低的飞机上。增压式发动机上装有增压器，外界的空气在进入气缸之前，先经过增压器提高压力，再进入发动机气缸。增压式发动机一般用在飞行高度较高的飞机上。

### 4. 按气缸排列的方式划分

根据气缸排列的方式不同，航空活塞发动机可分为直列型发动机和星型发动机。直列型发动机的气缸呈“列队”式前后排列，它又可分为单排直列型、水平对置型、H型、

V型等(图1-5)。目前使用的最常见的为水平对置型,气缸在机匣的左、右两侧各排成一行,彼此相对,这种发动机有四缸、六缸和八缸等。

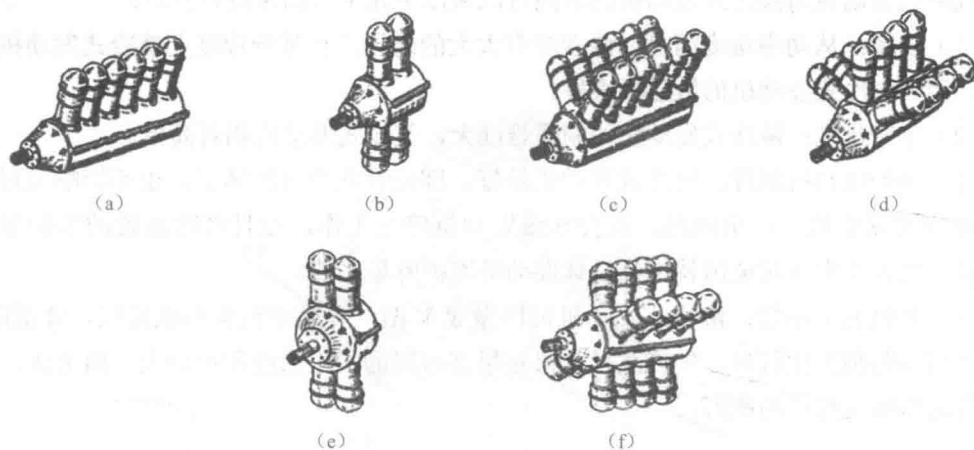


图 1-5 直列型发动机

(a) 单排直列型; (b) 水平对置型; (c) V型; (d) W型; (e) H型; (f) X型

星型发动机的气缸排列呈辐射状,又可分为单排星型和双排星型两种(图1-6)。目前由于航空喷气发动机的发展,双排星型活塞发动机在航空上的应用已不多见了,主要使用的是单排星型活塞发动机。

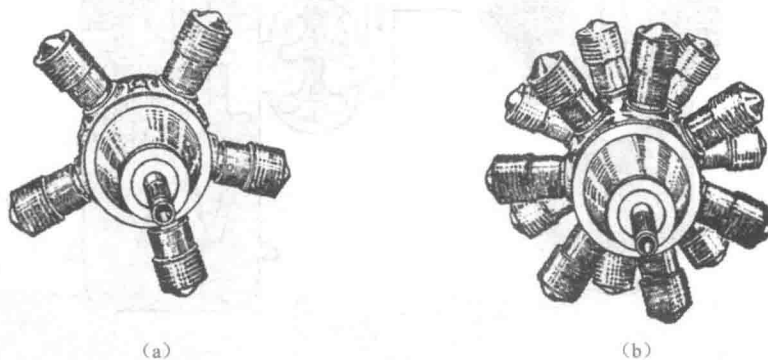


图 1-6 星型发动机

(a) 单排星型; (b) 双排星型

### 5. 按驱动螺旋桨的方式划分

根据发动机曲轴和螺旋桨之间是否安装减速器,航空活塞发动机可分为直接驱动式发动机和非直接驱动式发动机。直接驱动式发动机的螺旋桨由发动机曲轴直接驱动;非直接驱动式发动机的螺旋桨由发动机曲轴通过减速器驱动。图1-7所示为直接驱动的星型活塞发动机。

以上每项对发动机的划分,都只是说明发动机的某一个侧面,对具体的发动机,应综

合各种区别加以说明。例如，现在国内通航仍广泛使用的国产活塞五型（670型）航空活塞发动机（图 1-8），是九缸、单排星型、气冷式、汽化器式、非直接驱动式发动机，并带有增压器；美国莱康明公司生产的 IO-360 航空活塞发动机有四缸、水平对置型、气冷式、直接喷射式、吸气式、直接驱动式发动机。

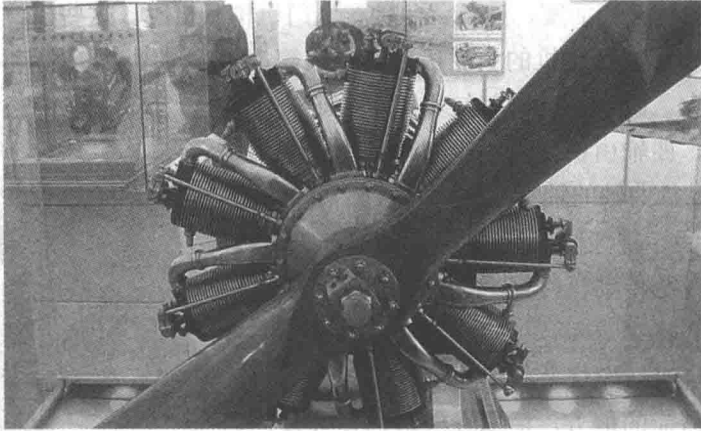


图 1-7 直接驱动的星型活塞发动机

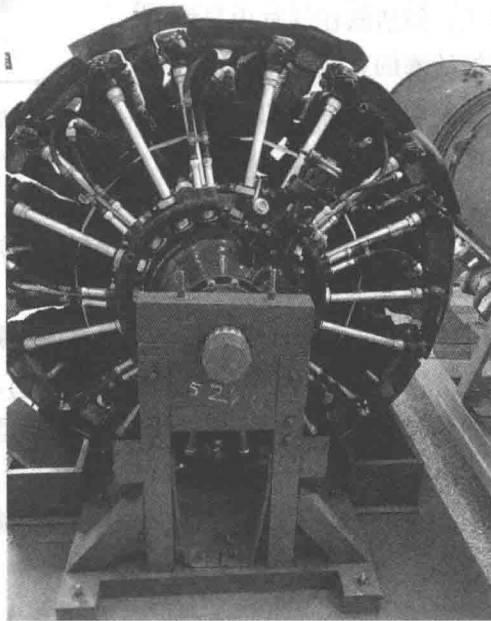


图 1-8 活塞五型（670 型）航空活塞发动机

### 1.1.2 航空活塞发动机的组成

装有活塞发动机的飞机，其向前飞行的拉力是由发动机带动的螺旋桨产生的，因此，螺旋桨就成了飞机的推进器，活塞发动机加上螺旋桨就组成了飞机的动力装置。有关螺旋

桨的知识本项目不作阐述，下面分析活塞发动机的组成时不包括螺旋桨推进器。

航空活塞发动机的形式千差万别，构造繁简不一，但是它们的基本组成部分和基本工作原理都大致相同。航空活塞发动机由下列主要机件和一些附件工作系统组成。

### 1. 主要机件

主要机件包括气缸、活塞、连杆、曲轴、气门机构和机匣。这些机件的位置如图 1-9 所示。气缸是航空活塞发动机的主要机件，呈圆筒形，固定在机匣上。活塞安装在气缸里面，并通过连杆和曲轴相连，曲轴由机匣支承。曲轴与螺旋桨轴相连，有的发动机曲轴的轴头本身就是螺旋桨轴。气门机构由进气门、排气门及凸轮盘（或凸轮轴）、挺杆、推杆、摇臂等传动机件组成，这些机件分别安装在气缸和机匣上。

气缸是混合气进行燃烧并将燃料燃烧释放出来的热能转换为机械能的地方。活塞在气缸内做往复运动，燃气的压力作用在活塞的顶面，活塞就被推动而做功。燃气所做的功最终用来带动螺旋桨旋转，产生拉力，使飞机前进，但活塞在气缸内只能做直线运动，因此，必须把活塞的直线运动转变为螺旋桨的旋转运动，这个任务即由连杆和曲轴来完成。如前所述，连杆的一端连接活塞，另一端与曲轴的曲颈相连。当活塞承受燃气的压力做直线运动

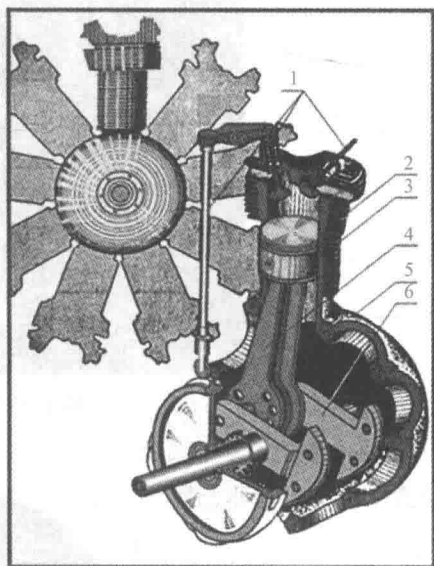


图 1-9 航空活塞发动机主要机件

1—气门机构；2—气缸；3—活塞；  
4—连杆；5—机匣；6—曲轴

时，经过连杆的传动，就能推动曲轴旋转，从而带动螺旋桨旋转。活塞、连杆和曲轴这三个密切关联的机件，通常又合称为曲拐机构。发动机运转时，气缸内不断进行气体的新陈代谢，气门机构的作用是控制气门的开启和关闭，以保证新鲜混合气（或空气）在适当的时机进入气缸，并保证燃烧做功后的废气适时地从气缸排出。机匣是发动机的壳体，它除用来安装气缸和支撑曲轴外，还将发动机的所有机件连接起来，构成一台完整的发动机。

大功率航空活塞发动机，在螺旋桨轴和曲轴之间一般都装有减速器，使螺旋桨轴的转速慢于曲轴的转速。

### 2. 工作系统

航空活塞发动机不但要具备上面所述的主要机件，而且必须有许多附件相配合，才能进行工作。发动机的附件分属于几个工作系统，每个工作系统担负发动机工作中一个方面的任务。航空活塞发动机一般都具有燃油、点火、润滑、冷却和启动等工作系统。

(1) 燃油系统。燃油系统的功用是不断地供给发动机适量的燃油，并将燃油雾化，同空气均匀混合形成可燃混合气。燃油系统的形式有汽化器式和直接喷射式两种。

(2) 点火系统。点火系统的功用是在适当的时刻产生电火花，点燃气缸内的混合

气。电火花是由安装在气缸上的电嘴在高压电的作用下产生的，产生高压电的附件称为磁电机。

(3) 润滑系统。润滑系统的作用是不不断地将润滑油送到各机件的摩擦面进行润滑，以减小摩擦阻力，减轻机件磨损。润滑油是在滑油泵的作用下，在润滑系统内部循环流动。

(4) 冷却系统。冷却系统的作用是把气缸的一部分热量散发到大气中，保证气缸的温度正常。冷却系统的形式有气冷式和液冷式两种。目前在航空上多采用气冷式冷却系统。

(5) 启动系统。启动系统的作用是发动机启动时，将曲轴转动起来，使发动机从静止状态转入正常工作状态。启动发动机的动力有气动力和电动力两种。



活塞发动机的  
分类和组成

## 1.2 航空活塞发动机的基本工作原理

航空活塞发动机将热能转变为机械能，是由活塞运动的几个行程来完成的。活塞运动四个行程完成一个工作循环的发动机，叫作四冲程发动机；活塞运动两个行程完成一个工作循环的发动机，叫作二冲程发动机。现代航空活塞发动机都属于四冲程发动机，本节只讨论四冲程发动机的工作循环。

### 1.2.1 基本术语

发动机工作时，活塞在气缸内做往复直线运动，通过连杆连接使曲轴做旋转运动。为了描述活塞的运动，下面参照图 1-10 介绍活塞发动机工作的常用术语。

(1) 上死点（也称上止点）：活塞顶距曲轴旋转中心最远距离的位置。

(2) 下死点（也称下止点）：活塞顶距曲轴旋转中心最近距离的位置。

(3) 曲轴转角：曲臂中心线与气缸中心线的夹角。

(4) 活塞行程  $L$ ：上死点与下死点之间的距离。

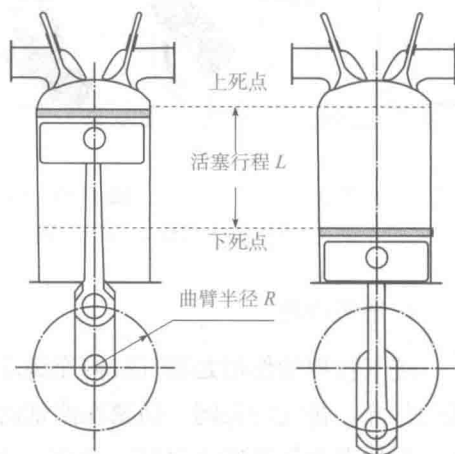


图 1-10 相关术语及关键位置

(5) 曲臂半径  $R$ ：曲轴旋转中心与曲颈中心的距离。由图 1-10 可见，它与活塞行程的关系为

$$L=2R$$

(6) 燃烧室容积  $V_{燃}$ ：活塞在上死点时，活塞顶与气缸头之间形成的容积。

(7) 气缸工作容积  $V_{工}$ ：上死点与下死点之间的气缸容积，若气缸直径为  $D$ ，则

$$V_{工} = \frac{\pi}{4} D^2 L$$

(8) 气缸全容积  $V_{全}$ ：活塞在下死点时，活塞顶与气缸头之间形成的容积。显然，气缸全容积也等于燃烧室容积与气缸工作容积之和，即

$$V_{全} = V_{燃} + V_{工}$$

(9) 压缩比  $\varepsilon$ ：气缸全容积  $V_{全}$  与燃烧室容积  $V_{燃}$  的比值，即

$$\varepsilon = \frac{V_{全}}{V_{燃}}$$

### 1.2.2 四冲程活塞发动机的工作原理

目前，飞机上采用的四冲程活塞发动机，每完成一个循环，活塞在上死点与下死点之间往返两次，连续地移动了四个行程，它们分别叫作进气行程、压缩行程、膨胀行程（工作行程）和排气行程。图 1-11 展示了发动机四个行程的工作图，下面分别加以说明。

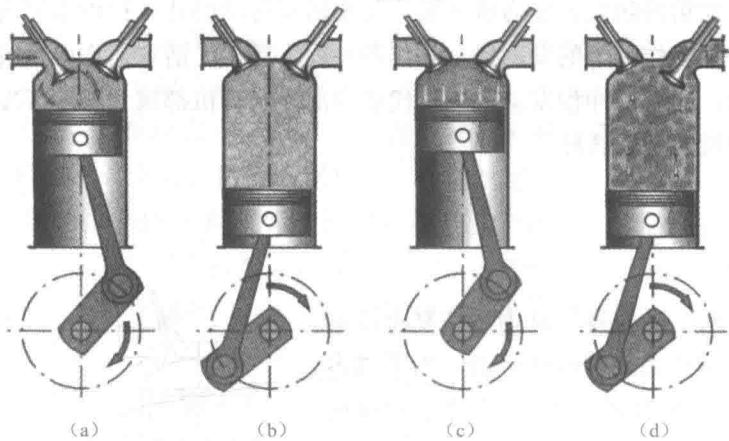


图 1-11 四冲程活塞发动机的工作循环

(a) 进气行程；(b) 压缩行程；(c) 膨胀行程（工作行程）；(d) 排气行程

#### 1. 进气行程

进气行程的作用是使气缸内充满新鲜混合气。进气行程开始时，活塞位于上死点，进气门打开，排气门关闭。活塞在曲轴的带动下，由上死点向下死点运动，气缸容积不断增大，新鲜混合气被吸入气缸，如图 1-11 (a) 所示。曲轴转动半圈（180°），活塞到达下死点，进气门关闭，进气行程结束。

## 2. 压缩行程

压缩行程的作用是对气缸内的新鲜混合气进行压缩，为混合气燃烧后膨胀做功创造条件。压缩行程开始时，活塞位于下死点，进、排气门关闭。活塞在曲轴的带动下，由下死点向上死点运动，气缸容积不断缩小，混合气受到压缩，如图 1-11 (b) 所示，气体的温度和压力不断升高。当曲轴旋转半圈、活塞到达上死点时，压缩行程结束。在理论上当压缩行程结束的一瞬间，电火花将混合气点燃并完全燃烧，放出热能，气体的压力和温度急剧升高。

## 3. 膨胀行程（工作行程）

膨胀行程（工作行程）的作用是使燃料的热能转换为机械能。膨胀行程开始时，活塞位于上死点，进、排气门关闭。燃烧后的高温、高压燃气猛烈膨胀，推动活塞，使活塞从上死点向下死点运动，如图 1-11 (c) 所示。这样，燃气对活塞便做了功。在膨胀行程中，气缸容积不断增大，燃气的压力、温度不断降低，热能不断地转换为机械能。当活塞到达下死点时，曲轴旋转了半圈，膨胀行程结束，燃气也变成了废气。

## 4. 排气行程

排气行程的作用是将废气排出气缸，以便再次充入新鲜混合气。排气行程开始时，活塞位于下死点，排气门打开，进气门仍关闭着。活塞被曲轴带动，由下死点向上死点运动，废气被排出气缸，如图 1-11 (d) 所示。当曲轴转了半圈，活塞到达上死点时，排气行程结束，排气门关闭。

排气行程结束后，又重复进行进气行程、压缩行程、膨胀行程（工作行程）和排气行程，航空活塞发动机就是这样周而复始往复运动的。从进气行程开始到排气行程结束，活塞运动了四个行程，完成了一个工作循环。一个循环结束后，又接着下一个循环，热能不断地转变为机械能，发动机连续不断地工作。因此，活塞发动机每完成一个工作循环，曲轴转动两圈（ $4 \times 180^\circ = 720^\circ$ ），进、排气门各开关一次，点火一次，气体膨胀做功一次。

活塞在四个行程运动中，只有膨胀行程获得机械功，其余三个行程都要消耗一部分功，消耗的这部分功比膨胀得到的功小得多。因此，从获得的功中扣除消耗的那部分功，所剩下的功仍然很大，用于带动附件和螺旋桨转动。



四冲程活塞  
发动机工作原理

### 1.2.3 航空活塞发动机气缸的点火次序

上面讨论了发动机里单个气缸内活塞四个行程的工作情形，但航空活塞发动机往往不是只有一个气缸，而是由多个气缸组成。无论发动机有多少个气缸，每个气缸内的活塞总是按四个行程的方式进行工作的。曲轴每旋转两圈，即完成一个循环，每个气缸内的活塞都经过进气、压缩、膨胀和排气四个行程，混合气也都被点燃一次。但是，各个气