

中国民用航空总局飞标司推荐  
民用航空器维修基础系列教材

# 活塞发动机

## (ME - PA、PH)

唐庆如 主编

兵器工业出版社

# 《民用航空器维修基础系列教材》 编写委员会

主任委员：徐超群

副主任委员：任仁良

编    委：徐超群  任仁良  郑连兴  许春生  
          李幼兰  王会来  朱丽君  刘建英  
          张铁纯  刘建新  郝劲松

## 出版说明

2005年8月,中国民航规章CCAR-66R1《民用航空器维修人员执照管理规则》考试大纲正式发布执行,该大纲规定了民用航空器维修持照人员必须掌握的基本知识。随着中国民用航空业的飞速发展,迫切需要大批高素质的民用航空器维修人员。为适应民航的发展,提高机务维修人员的素质和航空器维修水平,满足广大机务维修人员学习业务的需求,中国民航总局飞标司组织成立了《民用航空器维修基础系列教材》编写委员会,其任务是编写一套适用于中国民航维修要求,实用性强、高质量的培训和自学教材。

为方便机务维修人员通过培训或自学,参加维修执照基础部分考试,本系列教材根据CCAR-66R1民用航空器维修人员执照基础部分考试大纲编写。这套系列教材共11本,内容覆盖了考试大纲的所有模块,具体每一本教材的适用专业和对应的考试大纲模块见下表:

序号	书名	适用专业	覆盖CCAR-66R1考试大纲模块
1	电工基础	ME、AV	M3
2	电子技术基础	AV	M4、M5
3	电子技术基础	ME	M4、M5
4	空气动力学和维护技术基础	ME、AV	M6、M8
5	人为因素和航空法规	ME、AV	M9、M10
6	涡轮发动机飞机结构与系统	ME-TA	M11
7	涡轮发动机飞机结构与系统	AV	M11、M14
8	直升机结构与系统	ME-TH、PH	M12
9	活塞发动机飞机结构与系统	ME-PA	M13
10	燃气涡轮发动机	ME-TA、TH	M14、M16
11	活塞发动机	ME-PA、PH	M15、M16

该系列教材力求通俗易懂,紧密联系民航实际,针对性强,适合于民航机务维修人员或有志进入民航维修业的人员培训或自学用教材,也可作为CCAR-147维修培训机构的基础培训教材或参考教材。

在这套教材的编写过程中，我们得到了中国民航总局飞标司、中国民用航空学院、广州民航职业技术学院、中国民用航空飞行学院、民航管理干部学院、民航上海中等专业学校、北京飞机维修工程有限公司（Ameco）、广州飞机维修工程有限公司（Gameco）、中信海洋直升机公司等单位以及航空器维修领域的 40 多位专家的大力支持，在此一并表示感谢。

由于编写时间仓促和我们的水平有限，书中还存在着许多错误和不足，请各位专家和读者指出，以便再版时加以纠正。

**《民用航空器维修基础系列教材》编委会  
2006 年 2 月 10 日**

# 前 言

本书是根据 CCAR - 66 部咨询通告 AC - 66R1 - 02 《民用航空器维修考试大纲》和 CCAR - 147 部咨询通告 AC - 147R1 - 02 《民用航空器维修基础培训大纲》所规定的航空活塞发动机相关内容编写而成,是中国民用航空总局飞行标准司所属的“民用航空器维修人员执照考试管理中心”组织编写的民航维修人员基础自学系列教材之一。本书的内容涉及航空活塞发动机的结构和各工作系统,具体包括:航空活塞式发动机概述、航空活塞式发动机构造、进排气系统和散热系统、航空活塞式发动机工作过程及性能、航空活塞式发动机燃油系统、航空活塞式发动机滑油系统、航空活塞式发动机点火系统、航空活塞式发动机启动系统、航空活塞式发动机指示系统、动力装置的安装、发动机监控和地面操作、发动机油封与启封等。本书可作为民航维修人员学习航空活塞式发动机的基础培训教材,也可作为有志成为民航维修人员学习航空活塞式发动机基础知识的自学教材,还可作为民航各技术岗位人员进行业务学习的参考书。

本书的编写力求满足基础培训的通用性以及民航维修行业特点所要求的实用性和针对性。在重点介绍发动机结构和各系统的基本组成、工作原理的基础上,还着重介绍了日常维护和检查工作要点以及部分特殊维护项目的基本实施方法;同时,本书还注意吸收和归纳先进科学技术成果在现代航空活塞式发动机上的应用,体现知识、技术上的先进性和应用性。由于我国通用航空发展水平与世界航空发达国家相比还有较大差距,活塞式发动机飞机在我国应用量相对较小,导致国内可供利用的技术资料和维修资料也相对较少。所以本书编写时,在充分利用国内资源的前提下,还较多地借鉴了欧美等通用航空业发达国家的同类教材、培训资料、机型维护手册等相关资料,力争使教材达到全面性、整体性和系统性要求。本书在内容的采用上还具备一定前瞻性,力求在一段时间内能够较好地满足中国民航通用航空事业发展对航空器维修人员基础培训的要求。

本书对航空活塞式发动机结构和系统进行了一般性介绍,所有内容仅适用于基础培训或学习,不能作为航空维修实践的依据。应特别注意不要将本书所介绍的有关维护的工艺、技术和方法等基础性知识直接应用于具体发动机的维护和维修实践。

本书共有 12 章内容,其中第 1 章、第 2 章、第 4 章、第 5 章由唐庆如编写;第 3 章由冯世榕编写;第 6 章由宋炎编写;第 7 章由蒋平清编写;第 8 章由乔树旺编写;第 9 章、第 10 章、第 11 章由张洪涛、田风东编写;第 12 章由许春生编写。全书由唐庆如主编,并负责统稿和编写质量控制;冯世榕为第二主编,主要负责全书实际维修方面内容的把关。几位作者均为中国民用航空飞行学院教师和中国民航飞行学院洛阳分院机务维修工程师,具有较深厚的理论功底和多年从事航空活塞发动机维修及执照培训教学经验,为本书的编写完成付出了最大努力。考虑到自学教材的特殊要求,在理论阐述、问题描述、术语运用和插图等方面,尽量做到内容的详实、准确、图文并茂,文字的简洁、流畅、易读易懂。但由于作者工

作领域和水平的局限，书中定有不妥之处。诚恳希望本书使用者能够提出宝贵意见和建议，以便在本书修订时进一步完善。

在本书的成稿过程中，得到了广州民航职业技术学院、中国民航飞行学院机务处、航空工程学院和飞机修理厂等学校、部门的工程技术人员和专家的大力支持，得到了本书审定组蒋陵平、汤天明、王洪涛、何艳斌等专家的真诚指正和热忱帮助，在此深表谢意。

**编 者**  
**2006 年 10 月**

# 目 录

<b>第一章 航空活塞式发动机概述</b> .....	( 1 )
第一节 航空活塞式发动机的分类和组成 .....	( 1 )
第二节 航空活塞式发动机的基本工作原理 .....	( 4 )
第三节 航空活塞式发动机的理想循环 .....	( 8 )
<b>第二章 航空活塞式发动机的构造</b> .....	( 11 )
第一节 汽缸活塞组 .....	( 11 )
第二节 连杆、曲轴和减速器 .....	( 18 )
第三节 气门机构 .....	( 23 )
第四节 机匣 .....	( 30 )
第五节 主要机件的常遇故障和维护注意事项 .....	( 35 )
<b>第三章 进排气和散热系统</b> .....	( 41 )
第一节 进气系统 .....	( 41 )
第二节 排气系统 .....	( 47 )
第三节 散热系统 .....	( 51 )
<b>第四章 航空活塞式发动机的工作过程</b> .....	( 58 )
第一节 进气过程 .....	( 58 )
第二节 压缩过程 .....	( 65 )
第三节 燃烧过程 .....	( 67 )
第四节 膨胀过程 .....	( 82 )
第五节 排气过程 .....	( 84 )
第六节 发动机的实际循环 .....	( 88 )
第七节 航空活塞式发动机的功率和经济性 .....	( 90 )
第八节 航空活塞式发动机的特性 .....	( 99 )
<b>第五章 燃油系统</b> .....	( 104 )
第一节 航空汽油 .....	( 104 )
第二节 燃油系统概述 .....	( 108 )
第三节 汽化器的工作原理 .....	( 114 )
第四节 直接喷射装置的工作原理 .....	( 124 )

第五节 燃油调节装置的调整 .....	(126)
第六节 燃油系统的常见故障和维护注意事项 .....	(129)
<b>第六章 启动和点火系统 .....</b>	<b>(133)</b>
第一节 启动系统 .....	(133)
第二节 点火系统 .....	(139)
<b>第七章 滑油系统 .....</b>	<b>(160)</b>
第一节 滑油系统概述 .....	(160)
第二节 润滑系统工作原理 .....	(164)
第三节 滑油的冲淡 .....	(172)
<b>第八章 发动机指示系统 .....</b>	<b>(173)</b>
第一节 测压仪表 .....	(173)
第二节 测温仪表 .....	(175)
第三节 转速表 .....	(177)
第四节 燃油流量表 .....	(178)
<b>第九章 动力装置的安装 .....</b>	<b>(180)</b>
第一节 发动机的安装组件 .....	(180)
第二节 发动机的安装 .....	(184)
<b>第十章 发动机监控和地面操作 .....</b>	<b>(188)</b>
第一节 发动机监控参数和仪表 .....	(188)
第二节 发动机的试车检查 .....	(189)
第三节 汽缸的拆卸与安装 .....	(193)
第四节 冷缸检查 .....	(195)
<b>第十一章 发动机油封与启封 .....</b>	<b>(198)</b>
第一节 发动机的油封 .....	(198)
第二节 发动机的启封 .....	(199)
<b>第十二章 螺旋桨 .....</b>	<b>(200)</b>
第一节 螺旋桨原理 .....	(200)
第二节 螺旋桨的分类与结构 .....	(205)
第三节 涡轮螺旋桨发动机螺旋桨 .....	(207)
第四节 螺旋桨辅助系统 .....	(214)
第五节 螺旋桨检查、维护和安装 .....	(218)
<b>参考文献 .....</b>	<b>(225)</b>



# 第一章 航空活塞式发动机概述

航空活塞式发动机的型式千差万别，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体相同。航空活塞式发动机出现较早，发展期较长，在它的理论研究和实践应用方面都比较成熟和完善。直到现代，虽然出现了大功率的适用于高速飞行的喷气式发动机，活塞式发动机仍占有重要的地位。在飞行速度不太高的飞机上，航空活塞式发动机能发挥它的最大优点：耗油率低。因此，航空活塞式发动机在小型低速飞机上仍广泛采用。

本章主要通过介绍四行程点燃式发动机的组成、工作原理、理想循环以及发动机的性能等一般知识来说明航空活塞式发动机的基本工作原理和一般的特性。

## 第一节 航空活塞式发动机的分类和组成

### 一、航空活塞式发动机的分类

从基本工作原理方面的差别来看，航空活塞式发动机主要有四行程发动机和二行程发动机两种，后一种只是在过去的少数飞机上采用过，目前使用的航空活塞式发动机都是四行程发动机。由于长期发展的结果，航空活塞式发动机的种类繁多，型式千差万别。随着航空工业的不断发展，有些类型的航空发动机已逐渐淘汰，所以对航空活塞式发动机的分类，仅限于在目前仍广泛采用的类型，在此仅做一简单的划分。

#### (一) 按混合气形成的方式划分

根据形成混合气的方式的不同，航空活塞式发动机可分为汽化器式发动机和直接喷射式发动机。

汽化器式发动机中装有汽化器，燃油与空气在汽化器内混合好，再进入发动机汽缸中燃烧。直接喷射式发动机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，混合气在汽缸内形成。

#### (二) 按发动机的冷却方式划分

根据发动机的冷却方式不同，航空活塞式发动机分为气冷式发动机和液冷式发动机。图 1-1 和图 1-2 所示分别为两种冷却方式发动机的外形。

气冷式发动机直接利用飞行中的迎面气流来冷却汽缸和相关部件。

液冷式发动机利用循环的液体来冷却汽缸和相关

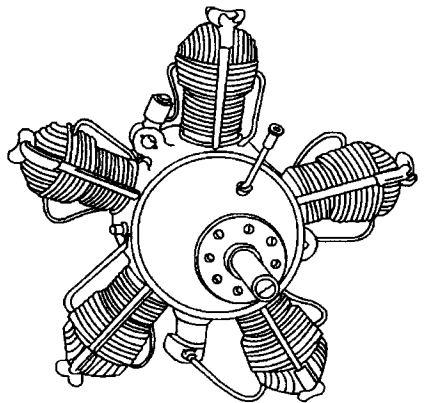


图 1-1 气冷式发动机

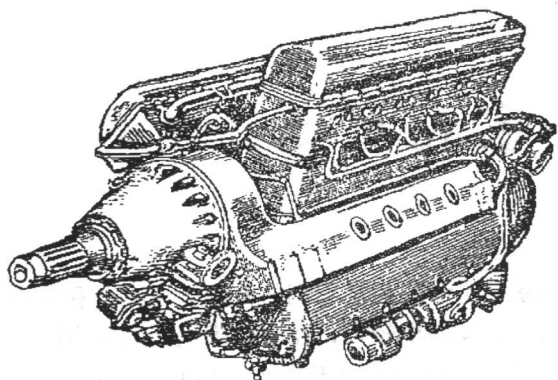


图 1-2 液冷式发动机

发动机汽缸。增压式发动机一般用在飞行高度较高的飞机上。

#### (四) 按汽缸排列的方式划分

根据汽缸排列的方式不同可以分为星型发动机和直列型发动机。直列型发动机的汽缸呈“列队”式前后排列，它又可分为单排直列型、水平对置型和 H 型或 V 型等形式。目前使用中最常见的为水平对置型，如图 1-3 所示。汽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。

星型发动机的汽缸排列呈辐射状，又可分为单排星型和双排星型两种。目前由于航空喷气发动机的发展，双排星型活塞式发动机在航空上的应用已减少，主要是单排星型活塞式发动机，如图 1-4 所示。

部件，然后冷却液再将所吸收的热量散入大气之中去。

#### (三) 按空气进入汽缸前是否增压划分

根据空气在进入汽缸前是否增压，航空活塞式发动机分为吸气式发动机和增压式发动机。

吸气式发动机工作时，外界的空气被直接吸入发动机汽缸。一般吸气式发动机用于飞行高度较低的飞机上。增压式发动机上装有增压器，外界的空气进入汽缸之前，先经过增压器提高压力后，再进入发

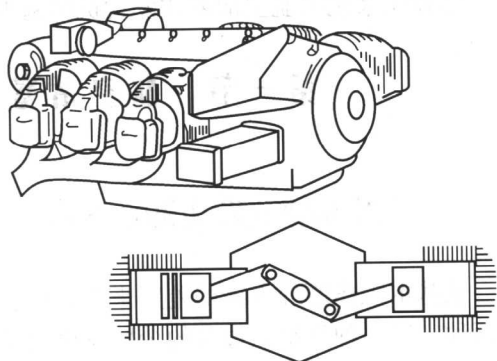


图 1-3 水平对置型发动机

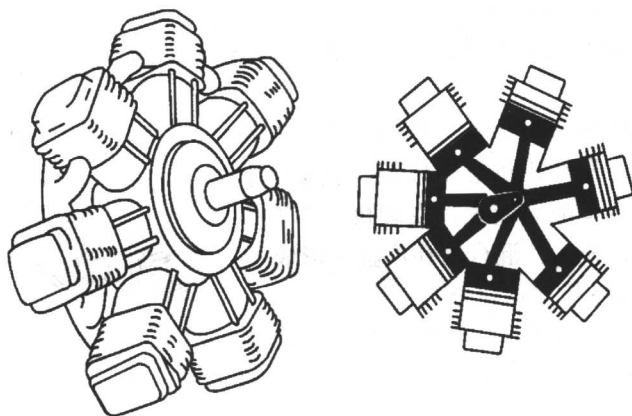


图 1-4 单排星型发动机

以上每一项对发动机的划分，都是只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。例如国产活塞五型（670 型）航空活塞式发动机，是九缸、单排星型、气冷式、汽化器式发动机并带有增压器；美国莱康明公司生产的 IO-540-C4D5D 是六缸、水平对置型、气冷式、直接喷射式、吸气式发动机。

## 二、航空活塞式发动机的组成

装有活塞式发动机的飞机，它向前飞行的拉力是由发动机带动的螺旋桨产生的，所以螺旋桨就成了飞机的推进器，活塞式发动机加上螺旋桨就组成了飞机的动力装置。有关螺旋桨的问题本章不作阐述，下面分析活塞式发动机的组成时不包括螺旋桨推进器。

航空活塞式发动机由下列主要机件和一些附件工作系统组成：

### （一）主要机件

航空活塞式发动机的主要机件包括汽缸、活塞、连杆、曲轴、气门机构和机匣。这些机件的相互位置关系如图 1-5 所示。汽缸呈圆筒形，固定在机匣上；活塞装在汽缸里面，并通过连杆和曲轴相连，曲轴由机匣支撑。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；气门机构是由进气门、排气门以及凸轮盘（或凸轮轴）、挺杆、推杆、摇臂等传动机件组成的，这些机件分别安装在汽缸和机匣上。

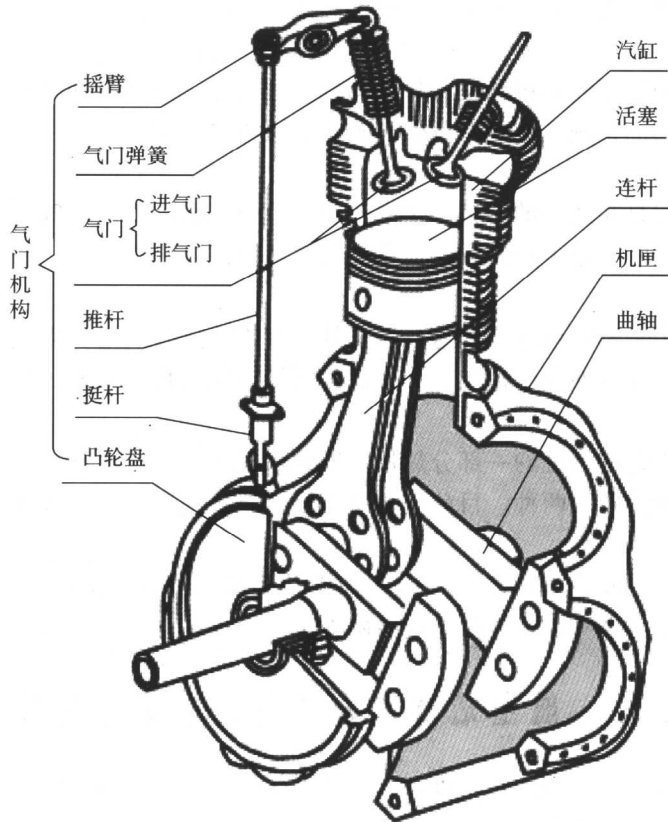


图 1-5 活塞式发动机的主要机件

汽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。活塞在汽缸内做往复运动，燃气的压力作用在活塞的顶面上，活塞就被推动而作功。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，但活塞在汽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时，经过连杆的传动，就能推动曲柄使曲轴旋转，从而带动螺旋桨旋转。活塞、连杆和曲轴这三个在运动中密切关联的机件，通常又合称为曲拐机构。发动机运转时，汽缸内不断进行着气体的新陈代谢，气门机构的作用就是控制气门的开启和关闭，以保证新鲜混合气（或空气）在适当的时机进入汽缸，和保证燃烧作功后的废气适时地从汽缸排出。机匣是发动机的壳体，它除了用来安装汽缸和支撑曲轴外，还将发动机的所有机件连接起来，构成一台完整的发动机。

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

### （二）工作系统

航空活塞式发动机不但要具备上面所述的主要机件，而且还必须有许多附件相配合，才能够进行工作。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。航空活塞式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当数量的燃油，并将燃油雾化，同空气均匀混合形成可燃混合气。燃油系统的型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，点燃汽缸内的混合气。电火花是由装在汽缸上的电嘴在高压电的作用下产生的，产生高压电的附件叫磁电机。

#### 3. 润滑系统

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

#### 4. 冷却系统

冷却系统的功用是把汽缸的一部分热量散发到大气中去，保证汽缸的温度正常。冷却系统的型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

启动系统的功用是发动机启动时，将曲轴转动起来，使发动机从静止状态转入正常工作。启动发动机的动力由气体压力和电动力两种。

## 第二节 航空活塞式发动机的基本工作原理

航空活塞式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，叫四行程发动机；活塞运动两个行程完成一个工作循环的发动机，叫二行程发动机。现代航空活塞式发动机都属于四行程发动机，本节只讨论四行程发动机的工作循环。

## 一、基本名词

发动机工作时，活塞在汽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，机构常用名词如图 1-6 所示。

(1) 上死点。活塞顶距曲轴旋转中心的最远距离的位置，如图 1-6 (a) 所示的位置。

(2) 下死点。活塞顶距曲轴旋转中心的最近距离的位置，如图 1-6 (b) 所示的位置。

(3) 曲轴转角。曲臂中心线与汽缸中心线的夹角。

(4) 活塞行程  $L$ 。上死点与下死点间的距离。

(5) 曲臂半径  $R$ 。曲轴旋转中心与曲颈中心的距离。

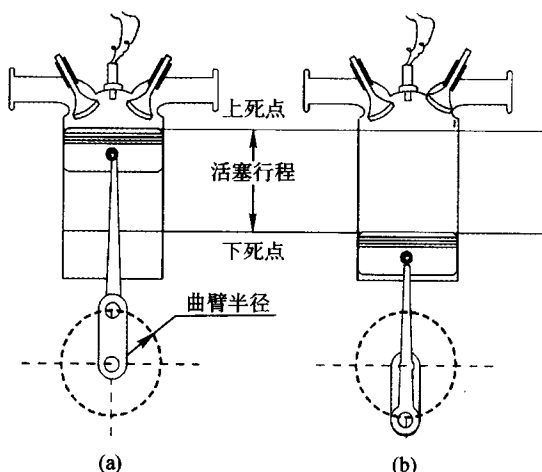


图 1-6 活塞式发动机的基本名词

由图可见，它与活塞行程的关系为：

$$L = 2R$$

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

(7) 汽缸工作容积  $V_{\text{工}}$ 。上死点与下死点之间的汽缸容积。若汽缸直径为  $D$ ，则：

$$V_{\text{工}} = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot L \quad (1-1)$$

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

$$V_{\text{全}} = V_{\text{工}} + V_{\text{燃}} \quad (1-2)$$

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

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{全}}}{V_{\text{燃}}} \quad (1-3)$$

## 二、四行程发动机的基本工作原理

目前飞机上采用的四行程活塞式发动机，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。它们分别叫做进气行程、压缩行程、膨胀行程（又称工作行程）和排气行程。图 1-7 所示为发动机四个行程的工作图，下面分别加以说明。

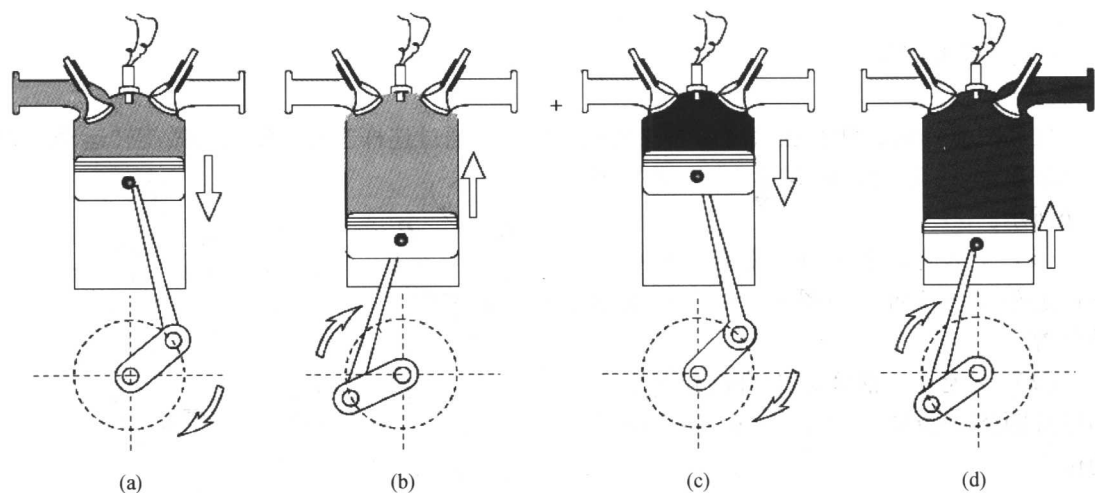


图 1-7 活塞式发动机的工作循环

### (一) 进气行程

进气行程的作用是使汽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，汽缸容积不断增大，新鲜混合气被吸入汽缸，如图 1-7(a) 所示。曲轴转动半圈 ( $180^\circ$ )，活塞到达下死点，进气门关闭，进气行程结束。

### (二) 压缩行程

压缩行程的作用是对汽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，汽缸容积不断缩小，混合气受到压缩，如图 1-7(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，气体压力和温度急剧升高。

### (三) 膨胀行程

膨胀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、排气门关闭着。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 1-7(c) 所示。这样，燃气对活塞便做了功。在膨胀行程中，汽缸容积不断增大，燃气的压力、温度不断降低，热能不断的转换为机械能。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。

### (四) 排气行程

排气行程的作用是废气排出汽缸，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，废气被排出汽缸，如图 1-7(d) 所示。当曲轴转了半圈，活塞到达上死点，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、膨胀行程和排气行程，航空活塞式发动机就是这样周而复始的往复运动的。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，活塞式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, 气体膨胀作功一次。

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, 剩下的功仍然很大, 用于带动附件和螺旋桨转动。

### 三、航空活塞式发动机汽缸的点火次序

上面讨论了发动机里单个汽缸内活塞四个行程的工作情形, 但航空活塞式发动机往往不是只有一个汽缸, 而是由多个汽缸所组成。不论发动机有多少个汽缸, 每个汽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, 每个汽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, 各个汽缸内同样的行程并非同时进行, 而是按一定的次序均匀错开的。各个汽缸的点火也是一样, 按相同的次序均匀错开。这样安排, 可以保证活塞推动曲轴的力量比较均匀, 发动机的运转较为平稳。

汽缸的工作次序与汽缸的排列型式有关, 下面仅就单排星型和水平对置型汽缸的点火次序作一说明。

#### (一) 单排星型发动机的汽缸工作次序

现以国产的九缸单排星型活塞五型发动机为例, 说明汽缸的点火次序。如图 1-8 所示, 每个汽缸的活塞都通过连杆连接到同一个曲轴的轴颈上, 曲轴转动时, 各汽缸内的活塞来回运动, 组成一个协调运动的整体。

右图 1-8 所示, 九个汽缸均匀地排列成星型, 相邻两个汽缸之间的夹角是  $360^\circ/9 = 40^\circ$ 。而发动机完成一个循环, 曲轴旋转两圈 ( $720^\circ$ ) 时, 九个汽缸都要点火一次, 为了使九个汽缸内气体膨胀作功均匀错开, 那么曲轴每转过  $720^\circ/9 = 80^\circ$  就要有一个汽缸点火。而 1 号与 3 号、3 号与 5 号……汽缸之间的夹角恰好是  $80^\circ$ 。可见, 曲轴按顺时针方向转动, 当 1 号汽缸点火工作后, 接着应该是 3 号汽缸点火工作, 然后便是 5 号汽缸、7 号汽缸……最后又轮到 1 号汽缸点火。于是, 九缸星型排列的发动机的汽缸点火顺序是:

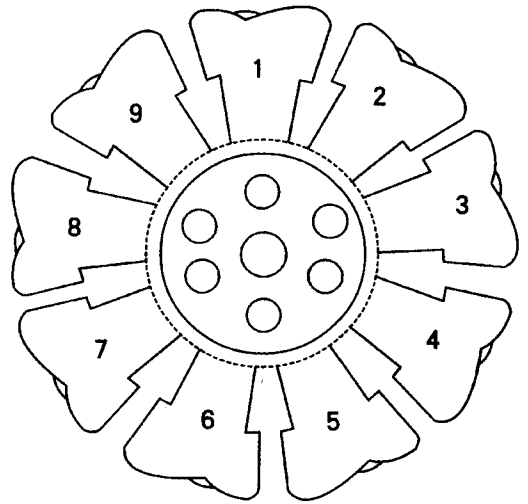


图 1-8 单排星型发动机

1-3-5-7-9-2-4-6-8-1

#### (二) 水平对置型发动机的汽缸点火次序

与星型发动机不同的是, 水平对置型发动机的曲轴不在同一个旋转面内, 如图 1-9 所示。确定该发动机的汽缸点火次序时, 应满足三个原则。第一, 各汽缸的点火间隔角应相等, 对六缸发动机来说, 点火间隔角为  $720^\circ/6 = 120^\circ$ 。第二, 曲柄的排列, 除满足上述要求外, 还应两两相对称, 以达到惯性离心力的自身平衡。第三, 应尽可能使连续点火的汽缸的曲柄不是相邻

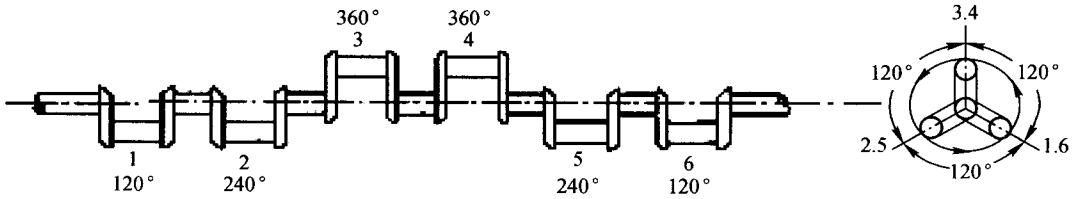


图 1-9 六缸水平对置型发动机曲轴

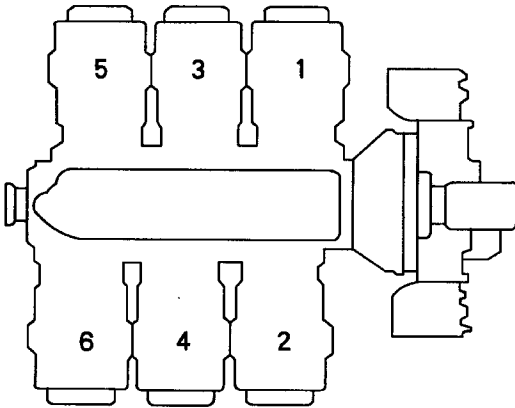


图 1-10 水平对置型发动机

的曲柄，从而使机匣受力更为均匀。

美国莱康明公司生产的六缸水平对置的 IO-540-C4D5D 航空活塞式发动机的汽缸排列及编号如图 1-10 所示。根据上述三条原则可以看出，1 号缸点火完以后，转 120° 应 4 号缸点火，4 号缸点完火转 120° 应是 5 号缸点火；5 号缸点完火转 120° 后从图 1-10 上看应该是 6 号缸，但 2 号缸和 6 号缸是同排，所以应安排 2 号缸点火，2 号缸点完火转 120° 是 3 号缸，之后是 6 号缸。因此，该发动机的点火次序是 1-4-5-2-3-6。

### 第三节 航空活塞式发动机的理想循环

当前使用的航空活塞式发动机都属于四行程点燃式。这类发动机的理想循环就是工程热力学中介绍过的奥托循环。为了说明这一点，下面先介绍发动机的理想工作过程。

#### 一、发动机的理想工作过程

四行程发动机每完成一个工作循环，活塞在汽缸内连续经过四个行程，工质则经历了进气、压缩、燃烧、膨胀和排气五个过程。在实际情况下，这些过程是相当复杂的，为了便于说明由各个实际过程所组成的实际循环的基本性质，这里先设想发动机的工作是在理想情况下进行的，这五个过程就叫做理想工作过程。所谓理想情况，是指过程进行中没有摩擦；气体同外界不发生热交换；燃烧和放热都不需要耗费时间。图 1-11 所示是把五个理想工作过程按进行的次序绘成的压容图，其纵坐标为压力，横坐标为汽缸容积。图上 0-1 表示进气过程，1-2 表示压缩过程，2-3 表示燃烧过程，3-4 表示膨胀过程，4-1-0 表示排气过程。

理想情况下的进气过程，因为没有流动损失，进入汽缸后的气体的压力始终与外界大气压相等，所以这个过程是等压进气过程。压容图上的进气过程线是一条平行于横轴的直线 0-1。

理想情况下的压缩过程，因为过程进行时气体不从外界吸热，也不向外界放热，并且没有摩擦，所以是理想绝热压缩过程。压容图上的压缩过程线是一条绝热过程线 1-2。



理想情况下的燃烧过程，因为没有热损失，混合气的燃烧不需要耗费时间，从燃烧开始直到结束，汽缸容积没有改变，所以是等容燃烧过程。压容图上的燃烧过程线平行于纵轴的直线 2-3。

理想情况下的膨胀过程，因为过程进行时气体同外界没有热交换，也没有摩擦，所以是理想绝热膨胀过程。压容图上的膨胀过程线是一条绝热过程线 3-4。

理想情况下的排气过程可以分为两个阶段。活塞刚刚到达下死点的一瞬间，排气门开放，在汽缸容积保持不变的情况下，一部分废气排出汽缸，汽缸内的废气压力立刻下降到等于外界大气压力。这是排气过程的第一阶段。压容图上，第一阶段的排气过程线是一条等容过程线，即平行于纵轴的直线，即图中的 4-1。当活塞从下死点向上死点运动时，废气被活塞推出汽缸，这是排气过程的第二阶段。在理想情况下，排气过程的第二阶段没有流动损失，所以在这个阶段中，汽缸内气体的压力也始终等于外界大气压力。在压容图上，第二阶段的排气过程是一条等压过程线，即平行于横轴的直线，如图中的 1-0 线。

由上可知四行程活塞式发动机的五个理想工作过程是：等压进气过程、绝热压缩过程、等容燃烧过程、绝热膨胀过程和由等容排气与等压排气两个阶段组成的排气过程。

## 二、发动机的理想循环

由上述理想工作过程压容图可以看出，从压缩过程开始，经过燃烧过程和膨胀过程，到排气过程的第一阶段结束，压容图上就构成了一个封闭的曲线。如果假想汽缸内的工质不必

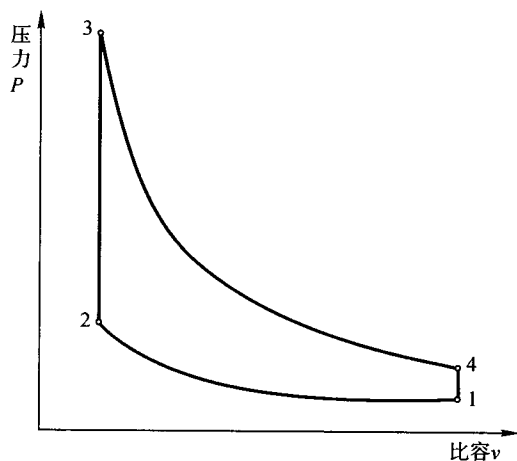


图 1-12 航空活塞式发动机的理想循环

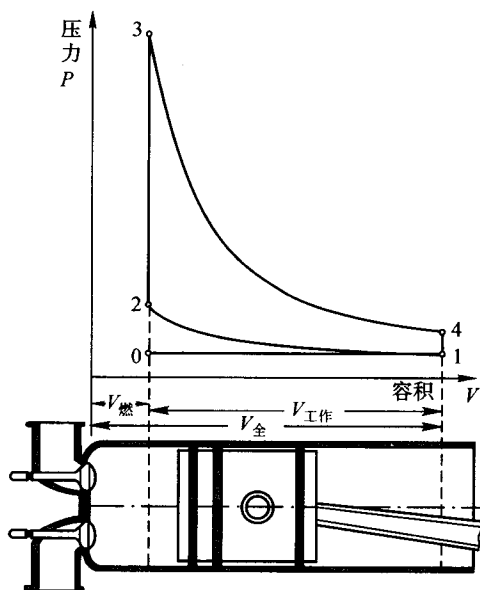


图 1-11 理想工作过程的压容图

排出，也无须重新引入，即略去理想工作过程中的进气过程和排气过程，同时，把等容燃烧过程看成是等容条件下工质从外界热源吸热的过程，把排气过程所放出的热看成是等容条件下工质向外界冷源放出的热。这样，就可以得出一个由可逆过程组成的封闭循环，这个循环叫做发动机汽缸内工质的理想循环，简称理想循环。

活塞式发动机的理想循环叫奥托循环，又叫定容加热循环，由下述四个可逆的工作过程组成：即绝热压缩过程、等容加热过程、绝热膨胀过程和等容放热过程，如图 1-12 所示。