

飞行技术专业系列教材

航空活塞动力装置

第2版

主编 李卫东 侯甲栋

西南交通大学出版社

·成都·

总序

民航是现代综合交通运输体系的有机组成部分，以其安全、快捷、通达、舒适等独特优势确立了独立的产业地位。同时，民航在国家参与经济全球化、推动老少边穷地区发展、维护国家统一和民族团结、保障国防和经济安全、加强与世界不同文明沟通、催生相关领域科技创新等方面都发挥着难以估量的作用。因此，民航业已成为国家经济社会发展的战略性先导性产业，其发达程度直接体现了国家的综合实力和现代化水平。

自改革开放以来，我国民航业快速发展，行业规模不断扩大，服务能力逐步提升，安全水平显著提高，为我国改革开放和社会主义现代化建设做出了突出贡献。可以说，我国已经成为名副其实的民航大国。站在新的历史起点上，在2008年的全国民航工作会议上，民航局提出了全面推进建设民航强国的战略构想，拉开了我国由民航大国迈向民航强国的序幕。

要实现民航大国向民航强国的转变，人才储备是最基本的先决条件。长期以来，我国民航业发展的基本矛盾是供给能力难以满足快速增长的市场需求。而其深层次的原因之一，便是人力资源的短缺，尤其是飞行、空管和机务等专业技术人员结构不合理，缺乏高级技术、管理和安全监管人才。有鉴于此，国务院在《关于促进民航业发展的若干意见》中明确指出，要强化科教和人才支撑，要实施重大人才工程，加大飞行、机务、空管等紧缺专业人才的培养力度。

正是在这样的大背景下，作为世界上最大的航空训练机构，作为中国民航培养飞行员和空中交通管制员的主力院校，中国民航飞行学院以中国民航可持续发展为己任，勇挑历史重担，结合自身的办学特色，整合优势资源，组织编写了这套“飞行技术专业系列教材”，以解当下民航专业人才培养的燃眉之急。在这套教材的规划、组织和编写过程中，教材建设团队全面贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要（2010—2020年）》，以培养适应民航业岗位需要的、具有“工匠精神”的应用型高素质人才为目标，创新人才培养模式，突出民航院校办学特色，坚持“以飞为主，协调发展”的方针，深化“产教融合、校企合作”，强化学生实践能力培养。同时，教材建设团队积极推进课程内容改革，在优化专业课程内容的基础上，加强包括职业道德、民航文化在内的人文素养教育。

由中国民航飞行学院编写的这套教材，高度契合民航局颁布的飞行员执照理论考试大纲及知识点要求，对相应的内容体系进行了完善，从而满足了民航专业人才培养的新要求。可以说，本系列教材的出版恰逢其时，是一场不折不扣的“及时雨”。

由于飞行技术专业涉及的知识点多，知识更新速度快，因此教材的编写是一项极其艰巨的任务。但令人欣喜的是，中国民航飞行学院的教师们凭借严谨的工作作风、深厚的学术造诣以及坚韧的精神品质，出色地完成了这一任务。尽管这套教材在模式创新方面尚存在瑕疵，但仍不失为当前民航人才培养领域的优秀教材，值得大力推广。我们相信，这套教材的出版必将为我国民航人才的培养做出贡献，为我国民航事业的发展做出贡献！

是为序。

中国民航飞行学院教材

编写委员会

2016年7月1日

再版前言

本书是按照飞行技术专业的培养目标，根据中国民航 CCAR-61 部对私人飞行员和商用飞行员的要求，以及中国民用航空局飞行标准司 2015 年年底下发的《私用驾驶员执照理论考试大纲》和 2016 年年初下发的《商用驾驶员执照理论考试大纲》的相关内容，并参照了国内外同类院校相关课程教学要求后编写而成。

由于新的大纲对知识点要求的变化，本书在第 1 版的基础上，对某些章节的内容进行了优化、重组、修改和更新。具体修订如下：在第二章增加了第四节“增压式发动机”；将“螺旋桨”单独编写为第四章；将“航空活塞发动机的性能”调整为第五章。同时，对某些章节的内容进行了一定程度的补充和完善。在编写中，着重阐明基本概念，突出飞行实际使用，结合典型实例分析，树立安全意识，尽量避免烦琐的数学公式推导，力求反映当前国内外航空活塞动力装置的实际情况和先进水平。

希望通过本教材的学习，能使读者了解航空活塞动力装置的基本组成及工作，理解发动机的主要性能，掌握发动机基本的使用方法。本书适合作为民航飞行技术专业学生的教材，也可作为希望获取私人飞行员执照和商用飞行员执照人员的参考书，以及民航其他专业工程技术人员的参考书。

本书绪论及第一、三章由中国民航飞行学院李卫东教授编写，第二、四、五章由侯甲栋讲师编写。全书由李卫东教授统稿，付尧明教授审阅了全稿，孙海东副教授在本书的编写过程中提出了很多宝贵意见，飞行器动力工程教研室的教师对本书的编写提供了大量帮助，在此一并致谢。

限于作者的理论水平和实践经验，书中难免有不少疏漏和不当之处，欢迎读者批评指正。

作 者

2016 年 3 月于中国民航飞行学院

主要符号

A	截面面积	H_{eq}	有效桨距
a	音速	hp	马力
at	工程大气压	PSI	磅力/平方英寸
atm	标准大气压	q_1	加给单位工质的热量
Bhp	制动马力	q_2	单位工质散发到大气的热量
c	流速	$q_{\text{混}}$	单位混合气的放热量
C	油气比	R	气体常数
CHT	气缸头温度	RPM	转/分 (r/min)
EGT	排气温度	SFC	燃油消耗率
$G_{\text{充}}$	充填量	T	绝对温度
i	减速比	T^*	总温
k	气体的绝热系数	v	比容 (比体积)
kgf	千克力	α	余气系数, 桨叶迎角
kn	节 (n mile/h)	γ	比重
$L_{\text{理}}$	理论空气量	ε	气缸压缩比
Ma	马赫数	η_e	有效效率
\dot{m}	质量流量	$\eta_{\text{热}}$	热效率
N_e	发动机有效功率	θ	提前点火角
n	转速	ρ	密度
p^*	总压	φ	桨叶角
p_m	进气压力	η_p	螺旋桨效率
H	几何桨距	R	螺旋桨桨叶空气动力

目 录

绪 论	1
一、热机和航空发动机	1
二、飞机对航空活塞发动机的基本性能要求	3
复习思考题	4
第一章 航空动力装置的基础知识	5
第一节 气体、气流的基本知识	5
一、气体的基本知识	5
二、气流的基本知识	10
第二节 燃烧的基本知识	16
一、燃烧反应	16
二、火焰的传播	18
第三节 奥托循环及热力学第二定律	23
一、奥托循环	23
二、热力学第二定律	24
复习思考题	27
第二章 航空活塞发动机的组成及工作	28
第一节 航空活塞发动机概述	28
一、航空活塞发动机的类型	28
二、航空活塞发动机的基本组成	30
三、航空活塞发动机的基本工作	34
第二节 发动机的进、排气过程和压缩过程	36
一、进气过程	36
二、排气过程	40
三、压缩过程	41
第三节 燃烧过程	42
一、正常燃烧过程	42
二、混合气的不正常燃烧	49

第四节 增压式发动机	56
一、机械增压	56
二、废气涡轮增压	58
三、两种增压系统的比较	58
四、混合增压	59
复习思考题	61
第三章 航空活塞式动力装置的工作系统	63
第一节 燃油系统	63
一、燃油系统的组成和工作	63
二、直接喷射式燃油调节器的工作	65
三、汽化器的工作	67
四、燃油管理	71
第二节 滑油系统	74
一、发动机机件的润滑方式	75
二、滑油系统的基本组成和工作	76
三、滑油系统的监控	77
第三节 散热系统	78
一、发动机散热的必要性	78
二、散热系统的组成和工作	79
三、气缸头温度的影响因素及调节	80
第四节 点火系统	82
一、点火系统的组成和工作	82
二、磁电机的工作	83
三、起动时高压电的产生	87
四、电嘴的工作	89
第五节 起动系统	90
一、起动系统的基本组成和工作	91
二、发动机的起动过程	92
三、发动机试车	95
复习思考题	97
第四章 螺旋桨	98
第一节 螺旋桨原理	98
一、螺旋桨的基本知识	98
二、桨距与滑流	99
三、螺旋桨拉力	100
四、螺旋桨的性能参数	100

第二节 螺旋桨分类与结构	101
一、螺旋桨分类	101
二、螺旋桨结构	103
第三节 螺旋桨变距	103
一、螺旋桨变距的目的	103
二、变距力矩	104
三、变距情形	104
四、螺旋桨的顺桨、回桨和反桨	105
五、调速器	106
第四节 螺旋桨的不正常工作	109
一、螺旋桨超转	109
二、螺旋桨振动	109
三、风车状态	110
复习思考题	111
第五章 航空活塞发动机的性能	113
第一节 发动机的主要性能指标	113
一、有效功率	113
二、燃油消耗率	116
三、发动机的加速性	117
四、发动机效率	118
第二节 发动机的使用性能	119
一、高度对发动机性能影响	119
二、发动机的综合性能曲线	122
三、发动机常见的工作状态	125
四、发动机的功率设置	127
复习思考题	130
中英文对照表	131
参考文献	140

绪 论

人类自古以来就怀有自由飞行的梦想。在社会生产力水平极其低下的年代，人们只能靠编织许多美丽的神话和传说来圆自己的飞行梦想。然而人类从未停止对飞行的执着探索和勇敢尝试，在中世纪的欧洲有人试图模仿鸟的飞行，虽最终都以失败告终，但却给后人留下了宝贵的经验。随着人们对空气动力学的认识不断加深，到 19 世纪初，英国人 G·凯利提出了：动力飞行必须依赖一种质量轻、推进力大的动力装置。

1883 年，汽油内燃机（活塞发动机）的问世，使人类实现自由飞行成为可能。1903 年 12 月 17 日，美国的莱特兄弟成功地驾驶“飞行者 1 号”，实现了人类第一次持续的、有动力的、可操纵的飞行，开创了现代航空的新纪元。1909 年 9 月 21 日，我国最早的飞行家冯如也研制出飞机并试飞成功。两次世界大战大大刺激了航空科学技术的发展，飞机的性能得到极大的提高和完善，飞行变得更加安全和舒适，飞机已广泛用在军事、航空运输等人们生活的各个方面。可以说，航空是 20 世纪发展最迅速，对人类社会进步影响最大的科学技术领域之一。

从航空发展的历史可以看出航空发动机在航空发展和飞行安全中的地位和作用。在讲授发动机的工作以前，我们先介绍有关发动机的几个基本概念。

一、热机和航空发动机

发动机是一种将某种能量转换成机械功的动力装置。根据能量的来源不同可分为：热力发动机；水利发动机；电力发动机；原子能发动机等。热力发动机是将燃料的热能转换成机械功的动力装置；水利发动机是将重力势能转换成机械功的动力装置；电力发动机是将电能转换成机械功的动力装置；原子能发动机是将原子能转换成机械能的动力装置。

热机的工作由两大步骤组成：首先必须将燃料燃烧释放出热能，再将释放出的热能转换成机械功。所以，根据热机燃料的燃烧方式，热机又分为外燃机（即蒸汽机）和内燃机。外燃机工作时燃料在气缸外部燃烧，燃料与工质气体不混合参与做功，如图 0.1 所示；内燃机工作时燃料在气缸内部燃烧，燃料与工质气体混合参与做功，如图 0.2 所示。外燃机体积大，结构笨重，热利用率极低，根本无法用在飞机上。

航空发动机是一种将燃料的热能转换成机械功的动力装置，属于热机范畴。只是因用在飞机上，其性能要求更高，必须满足飞机对动力装置的要求。目前，航空发动机分为两大类型：航空活塞发动机和航空喷气发动机。

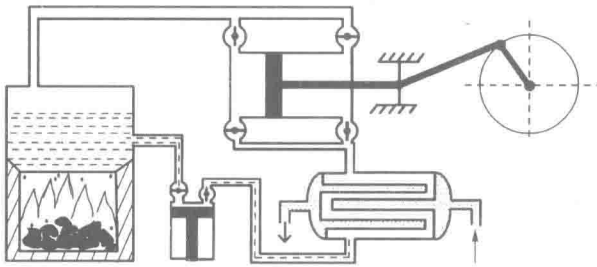


图 0.1 外燃机

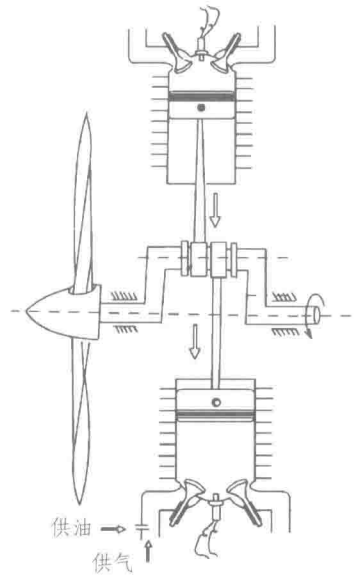


图 0.2 航空活塞发动机

航空活塞发动机是一种四行程（或二行程）、电嘴点火、往复式汽油内燃机，如图 0.2 所示。从 1903 年第一架飞机升空到第二次世界大战末期，所有飞机都用活塞发动机作为动力装置。航空活塞发动机工作时，气缸内燃料释放出的热能通过曲轴输出扭矩，带动螺旋桨转动，产生推进力。所以，航空活塞发动机必须依赖螺旋桨作为推进器。航空活塞发动机具有低速经济性好，工作稳定性好的优点；但也存在重量功率比大，高空性能、速度性能差的缺点，故航空活塞发动机常用在轻型低速飞机上。目前航空活塞发动机主要以航空汽油为燃料，某些特殊型号的航空活塞发动机也使用航空煤油作为燃料，本书主要讲解以航空汽油为燃料的航空活塞发动机的工作原理。

航空喷气发动机是将燃料在燃烧室内连续燃烧释放出的热能转换成气体动能，从发动机高速喷出，产生推进力的动力装置，以航空煤油为燃料，如图 0.3 所示。它可不依赖螺旋桨直接产生推力。喷气发动机在第二次世界大战以后，得到迅速发展。目前在航空领域，各种类型的喷气发动机占据着统治地位。喷气发动机种类较多，性能也各有千秋，较航空活塞发动机而言具有重量轻，推力大，高空性能、速度性能好的优点；但也存在经济性较差的缺点。

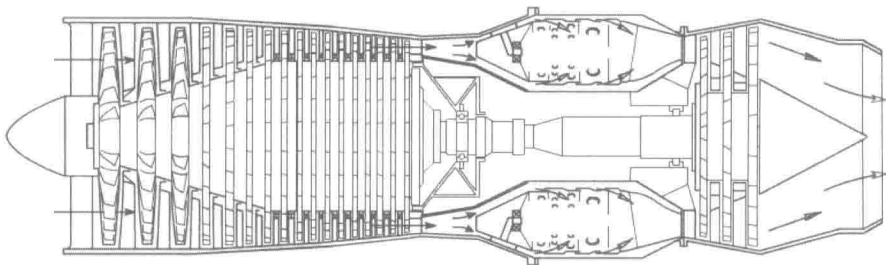


图 0.3 航空喷气发动机

二、飞机对航空活塞发动机的基本性能要求

由于发动机的工作对飞机的性能、飞行安全和效益起着决定性作用，而且初教机大多为单发飞机，同时学员初学飞行，动作不免粗猛。所以航空活塞发动机应满足下列基本性能要求：

1. 发动机重量功率比小

在发动机重量一定时，发动机发出的功率越大，飞机的起飞、复飞及爬升性能越好；同样，在发动机功率一定时，发动机重量越轻，飞机的飞行性能也越好。通常以发动机的重量与功率之比来衡量发动机的轻重，比值越小，表明发动机产生 1 马力的功率所负担的自身重量越小，发动机就越轻。

目前，航空活塞发动机的重量功率比一般在 $0.5 \sim 1.2 \text{ kgf/hp}$ ，某些性能优良的发动机，此值可降到 $0.3 \sim 0.35 \text{ kgf/hp}$ 。

2. 发动机燃油消耗率低

发动机燃油消耗率用来衡量发动机的经济性。在一定的飞行条件下，发动机燃油消耗率越低，运行成本越低，经济性越好；同时飞机的续航时间也越长。

发动机燃油消耗率的定义是：发动机在单位时间产生单位功率所消耗的燃油量。发动机的经济性是以发动机每发出 1 hp 的功率，在 1 h 内所消耗的燃油量多少来衡量的。目前，航空活塞发动机的燃油消耗率一般在 $0.18 \sim 0.38 \text{ kgf}/(\text{hp} \cdot \text{h})$ 。

3. 发动机尺寸要小

发动机的尺寸主要是指发动机的迎风面积和长度，减小发动机尺寸尤其是迎风面积可有效减小飞行阻力，减轻发动机重量。

4. 发动机可靠性要好

发动机可靠性是指在各种气象条件和飞行条件下，发动机稳定、安全工作的品质。描述发动机可靠性的参数是空中停车率， $\text{空中停车率} = \text{发动机空中停车数}/\text{每千飞行小时}$ 。需要指出的是，对于最初投入使用的新发动机和接近翻修寿命的发动机，其工作的可靠性较差。

5. 发动机的使用寿命要长

发动机寿命有翻修寿命和总寿命之分。翻修寿命是发动机制造厂商规定的从发动机出厂到第一次翻修或两次翻修间的使用期限，总寿命是指发动机经若干次翻修后停止使用时的使用期限。发动机寿命的计算是以记录发动机实际运行时间和发动机热循环次数为基础，以先到的参数为准。当然，在发动机寿命内，若使用或维护不当也可能引起发动机提前翻修。所以，在实际使用中发动机的使用寿命与发动机的正确使用密切相关，正确使用发动机不仅可以有效延长发动机的使用寿命，还可降低发动机的使用成本。

6. 发动机要便于维护

在实际飞行中,发动机维护性的好坏直接影响飞行的正常及维护成本。要使发动机便于维护,降低维护成本,对发动机的设计、制造都有相应要求,如发动机的安装位置,零部件的通用性及可更换性,零部件的快速拆卸及安装等。

从以上条件可以看出,发动机要同时达到以上指标是极其困难的,有的甚至是相互矛盾的。如要提高发动机可靠性必然会使发动机的结构更为复杂,使发动机重量、结构尺寸增加等。发动机制造商通常针对具体飞机发动机的特点,作适当的取舍和侧重,从而使发动机的综合性能得到优化。

作为用在轻型低速飞机上的航空活塞发动机,在增大功率、减轻重量、提高可靠性、减低耗油率等方面还有一定的潜力。

本书分为5章,分别介绍航空发动机的基础知识;航空活塞发动机的基本组成及工作;航空活塞发动机的工作系统;螺旋桨;航空活塞发动机的性能。“航空活塞动力装置”这门课程是飞行技术专业的必修课,通过该课程的学习,为学员取得私人飞行员执照、商用飞行员执照奠定基础;同时为今后取得航线运输驾驶执照及从事航线运输飞行打下必要的理论基础。学习本书内容,应注重理论联系实际,突出安全意识。本书以确保发动机安全工作,正确使用和操纵发动机,充分发挥发动机性能,满足飞机飞行性能要求为知识主线,贯穿各知识点。学习本课程内容后,应达到下列基本要求:理解有关航空发动机的基础知识;理解航空活塞动力装置的基本组成及工作;熟悉发动机性能及大气条件对性能的影响;熟悉发动机常见的不正常工作的原因、现象及危害,掌握预防及处置措施;理解发动机常见仪表指示参数的意义。

复习思考题

1. 简述航空活塞发动机的发展历程。
2. 什么是热机?航空发动机分为哪两大类型?各有何特点?
3. 飞机对航空活塞发动机的要求有哪些?
4. 本课程的学习要求是什么?

第一章 航空动力装置的基础知识

本章将分别简要介绍与航空发动机工作有关的工程热力学、气体动力学及燃烧的基础知识，凡相邻学科已讲授的内容，本书将不再重复。学生应理解有关概念的物理意义，为今后更好地理解航空发动机的工作及性能、正确使用发动机奠定必要的理论基础。

第一节 气体、气流的基本知识

一、气体的基本知识

1. 工质

航空发动机是一种热力发动机，热机工作时，必须以某种物质为媒介，才能将热能转换成机械能，完成这种能量转换的媒介物叫工质。在物质三态中，由于气体分子具有运动速度最快、分子间间隙最大、分子间吸引力最小这些特点，决定了气体具有良好的膨胀性、压缩性和流动性，易于实现能量转换。所以，航空发动机都选择气体作为工质。

2. 理想气体

分子本身只有质量而不占有体积，分子间不存在吸引力的气体叫理想气体。理想气体是为了便于分析，从实际气体中抽象出来的假想气体。发动机实际工作中的工质气体在发动机工作的温度和压力范围内，性质与理想气体非常接近。所以，我们将航空发动机的工质气体都作为理想气体来处理。

3. 气体的状态参数

描述气体状态的物理量叫气体的状态参数。最常见的有气体的比容（比体积）、压力和温度。气体的比容的定义是：单位质量的气体所占有的容积，以符号 v 表示。即

$$v = \frac{V}{m} \quad (1-1)$$

比容的标准单位是 m^3/kg 。气体的比容是描述气体分子疏密程度的物理量，气体的比重、密度也是描述气体分子疏密程度的物理量。对一定质量的气体，当其容积变大时，

比容增大, 气体膨胀, 气体对外做功; 反之, 当其容积变小时, 比容减小, 气体被压缩, 外界对气体做功。所以, 从气体比容的变化可以看出气体做功的情形, 对气体而言, 比容较密度和比重更常见。

在标准大气条件下, 海平面上空气的比容为 $0.816 \text{ m}^3/\text{kg}$, 比重为 1.2256 kgf/m^3 ; 高度为 $11\,000 \text{ m}$ ($36\,089 \text{ ft}$) 时, 空气的比容为 $2.746 \text{ m}^3/\text{kg}$, 比重为 0.364 kgf/m^3 。当飞行高度升高时, 大气比重减小。

气体的温度描述了气体的冷热程度, 是分子热运动平均移动功能的度量。温度的分度方法叫温标。常用的温标有摄氏温标、华氏温标和绝对温标 3 种。

摄氏温标规定: 在一个物理大气压下, 纯水结冰时的温度 (冰点) 为 0 摄氏度, 沸腾时的温度 (沸点) 为 100 摄氏度, 中间分为 100 等分, 每等分代表 1 摄氏度。摄氏温标单位的代号是 $^{\circ}\text{C}$, 例如 20 摄氏度可记作 20°C 。摄氏温标由瑞典人摄氏 (Celsius) 创立, 是日常生活中使用最广泛的温标, 发动机的滑油温度、气缸头温度和排气温度等的度量常采用摄氏温标。

华氏温标规定: 在一个物理大气压下, 纯水结冰时的温度 (冰点) 为 32 华氏度, 沸腾时的温度 (沸点) 为 212 华氏度, 中间分为 180 等分, 每等分代表 1 华氏度。华氏温标单位的代号是 $^{\circ}\text{F}$, 例如 50 华氏度可记作 50°F 。华氏温度与摄氏温度的换算关系为

$$F = \frac{9}{5}t + 32 \quad (1-2)$$

$$t = \frac{5}{9}(F - 32) \quad (1-3)$$

式中 F ——华氏温度 ($^{\circ}\text{F}$);

t ——摄氏温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

华氏温度由德国人 Fahrenheit 创立, 由于创立较早, 在西方国家使用较为广泛。美、英制发动机的滑油温度、气缸头温度等的度量常采用华氏温标。

热力学温度是以理想气体分子完全停止热运动时的温度为绝对零度, 每度大小与摄氏温标相同, 热力学温度单位的代号是 K 。根据理论研究结果表明: 0 K 相当于摄氏零下 273.16 摄氏度 (在实际计算中常取 -273°C)。所以, 绝对温标与摄氏温标的换算关系为

$$T = t + 273 \quad (1-4)$$

式中 T ——热力学温度 (K);

t ——摄氏温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

热力学温度由英国人 Kelvin 创立, 主要用于热力学计算, 故称为热力学温度。3 种温标的关系如图 1.1 所示。

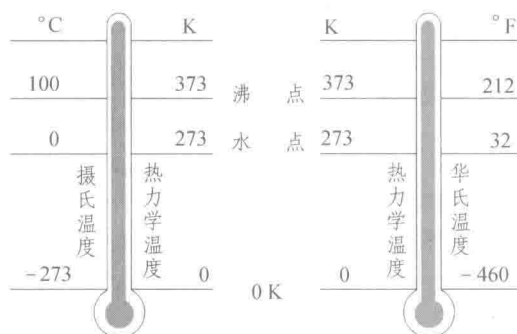


图 1.1 3 种温标

例如，摄氏温度 $t = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，代入公式 (1-2)、(1-4)，可计算出对应的华氏温度 $F = 59\text{ }^{\circ}\text{F}$ ，热力学温度 $T = 288\text{ K}$ 。

华氏温度 $F = 100\text{ }^{\circ}\text{F}$ 时，代入公式 (1-3)、(1-4)，可计算出对应的摄氏温度 $t = 37.78\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，热力学温度 $T = 310.78\text{ K}$ 。

气体的压力是垂直作用在壁面单位面积上的力，是气体分子碰撞器壁的结果，以符号 p 表示。国际单位制中的标准单位是 Pa (N/m^2)。为了便于测量和使用，在实际应用中还常用以下压力单位：

百帕 (hPa): $1\text{ hPa} = 100\text{ Pa} = 1\text{ mbar}^*$ ($1\text{ bar} = 10^5\text{ Pa}$)

千帕 (kPa): $1\text{ kPa} = 1\text{ 000 Pa}$

工程大气压 (at): $1\text{ at} = 1\text{ kgf}/\text{cm}^2 = 98\text{ 066.5 Pa}$

工程大气压广泛用在液体压力的测量仪表中，发动机滑油、燃油压力常用此单位。

标准大气压 (atm): 温度为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，海平面上空气的平均压力， $1\text{ atm} = 1.033\text{ at}$ 。

PSI: $1\text{ PSI} = 1\text{ lbf}/\text{in}^2 \approx 0.07\text{ kgf}/\text{cm}^2 = 6\text{ 894.8 Pa}$; $1\text{ kgf}/\text{cm}^2 \approx 14.3\text{ PSI}$ 。

PSI 在美、英制发动机中广泛用在测量液体压力的仪表中，发动机滑油、燃油压力常用此单位。

毫米 (或英寸) 汞柱: 1 毫米 (或英寸) 汞柱的压力等于高为 1 毫米 (或英寸) 汞柱的重力对其底部所产生的压力，如图 1.2 所示。航空活塞发动机的进气压力常用此单位。

1 标准大气压 = 760 毫米汞柱 (29.92 英寸汞柱) = 1 013 hPa

压力的测量可用装有某种液体 (如汞) 的弯管来测量，如图 1.3 所示。

* bar——非法定计量单位， $1\text{ bar} = 100\text{ kPa}$ 。

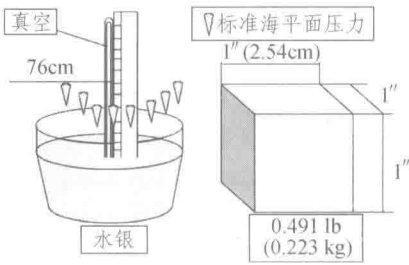


图 1.2 大气压力测量图

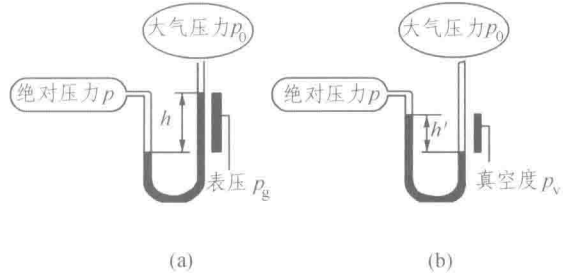


图 1.3 表压及真空度

在图 1.3 (a) 中, 容器内的压力高于大气压力, 汞柱高度 (h) 即代表容器内压力高于大气压力的数值, 这个压力叫作表压力, 用 p_g 表示。为了区别表压力, 将容器内的压力叫作绝对压力。所以, 绝对压力与表压力的关系为

$$p = p_g + p_0 \quad (1-5)$$

式中 p ——绝对压力;

p_g ——表压力;

p_0 ——大气压力。

发动机的滑油压力、燃油压力等液体压力测量的都是表压。

如果容器内的压力低于大气压力, 弯管内的汞柱就如图 1.3 (b) 所示。汞柱高度 (h') 代表容器内压力低于大气压力的数值, 这个压力叫作真空度, 用 p_v 表示。容器内的绝对压力与真空度的关系为

$$p_v = p_0 - p \quad (1-6)$$

在热力计算中, 都必须使用绝对压力。

4. 气体的状态方程

气体的比容 v 、温度 T 、压力 p 从不同侧面反应气体的性质, 根据气体分子运动理论, 它们之间相互的联系可由状态方程表示, 即

$$pv = RT \quad (1-7)$$

式中 p ——气体的绝对压力 (N/m^2);

v ——气体的比容 (m^3/kg);

T ——气体的热力学温度 (K);

R ——气体常数 [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]。

常见气体的气体常数 R 数值如表 1.1 所示。

表 1.1 常见气体的气体常数 R 的数值

气体	$R/[J/(kg \cdot K)]$	气体	$R/[J/(kg \cdot K)]$
氧	26.00	氮	297.20
氢	4 158.88	一氧化碳	297.20
空气	287.10	二氧化碳	189.31

所以, 根据状态方程, 气体状态参数 p 、 v 、 T 中, 只有两个参数是独立的, 已知任意两个参数, 就可求出第三个。在热力学中常用压力和比容作为独立参数, 并将气体的状态通过 p - v (压容) 图的形式表示出来, 如图 1.4 所示。 p - v 图上每一个点表示气体的一个状态, 当气体的状态发生变化时, 把变化过程中每一瞬间的状态都在压容图上用点表示出来, 就得到一条曲线。所以压容图上的一条曲线, 就表示气体状态的一个变化过程。

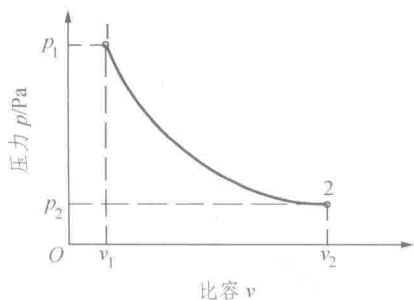
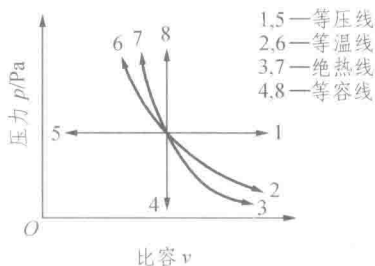
图 1.4 p - v 图

图 1.5 特殊热力过程

5. 气体的热力过程

气体理想的热力过程有: 等容过程、等压过程、等温过程和绝热过程。这些理想热力过程的 p - v 图如图 1.5 所示。等容过程是比容不变的热力过程, 航空活塞发动机的燃烧过程就是近似的等容过程; 等压过程是压力不变的热力过程, 航空燃气涡轮发动机的燃烧过程就是近似的等压过程; 等温过程是温度不变的热力过程; 绝热过程是气体与外界没有热交换的热力过程, 航空活塞发动机和航空燃气涡轮发动机的压缩和膨胀过程就是近似的绝热过程。经理论推导, 在绝热条件下, 气体的压力和比容满足下列关系

$$pv^k = \text{常数} \quad (1-8)$$

式中 k ——气体绝热指数。对空气, $k=1.4$; 对燃气, $k=1.330$ 。

绝热过程, 气体参数间的关系经推导为

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k \quad (1-9)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} \quad (1-10)$$