



北京高等教育精品教材

BEIJING GAODENG JIAOYU JINGPIN JIAOCAI

李汝辉 吴一黄 编著

活塞式航空动力装置

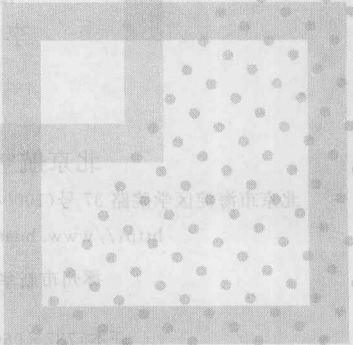
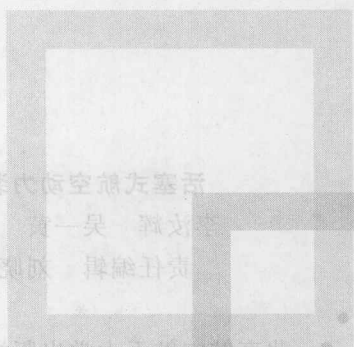


北京高等教育精品教材

BEIJING GAODENG JIAOYU JINGPIN JIAOCAI

活塞式航空动力装置

李汝辉 吴一黄 编著



北京航空航天大学出版社

内容简介

本书根据中国民航对飞行员的要求,集国内外同类专业与作者多年的教学经验编写而成。内容包括:航空动力装置的有关基本知识;活塞式航空发动机的组成、工作原理和各种附属工作系统;螺旋桨与变距;发动机性能和动力装置的操控。

本书编写原则是:内容上抓准必须学习的知识点,力争少而精;编排上系统性强;阐述简明扼要,重点突出,紧密联系实际;便于自主学习。

本书可作为现代民航飞行技术专业的教材,还可用做其他相关专业的教学和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

活塞式航空动力装置/李汝辉,吴一黄编著. —北京:
北京航空航天大学出版社,2008.1

ISBN 978-7-81124-273-7 李汝辉 吴一黄 编著

I. 活… II. ①李…②吴… III. 活塞式发动机:航空发
动机—动力装置 IV. V234

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 193579 号

活塞式航空动力装置

李汝辉 吴一黄 编著

责任编辑 刘晓明

*

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(100083) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail:bhpress@263.net

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:10.5 字数:235 千字

2008 年 1 月第 1 版 2008 年 1 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978-7-81124-273-7 定价:18.00 元

前 言

我国民航事业正处于高速发展时期,为把我国建设成世界民航强国,急需培养大批高素质的飞行员和相关工程技术人员。大好形势促使编写优质教材。《活塞式航空动力装置》一书根据中国民航对飞行员培养的要求,集国内外同类专业和作者多年的教学经验编纂而成。

本书共设9章:第1章介绍航空动力装置的有关基础知识;第2章讲述活塞式航空发动机的组成和工作原理;第3章至第6章介绍发动机的各个附属工作系统——点火与启动系统、燃油系统、滑油系统和冷却系统;第7章介绍螺旋桨及其变距;第8章介绍发动机的性能;第9章是活塞式航空动力装置的操控。这些都是民航飞行员应掌握的基本知识和获取飞机驾驶执照所必备的条件。

编写本书所追求的目标是力争达到国际先进水平。编写过程所遵循的原则是:抓准学生应该掌握的知识点,选材少而精;编排上系统性强;阐述简明扼要,重点突出,紧密联系飞行实际。为便于自主学习,于各章之后附有精选的复习题,书后还分章列出主要技术词汇的中英文对照表。为适应我国民航当前的现状,本书除使用国际单位制(SI)外,在有的章节中还引用了英、美制单位。

本书可作为民航飞行技术专业的教材,亦可用做其他相关专业的教学和工程技术人员的参考书。

在本书编写过程中得到郑光华教授的许多帮助,并由郑光华教授作全书审校。

由于作者水平有限,若书中有不当和错误,敬请读者指正。

作 者

2007年10月于北京航空航天大学

目 录

| | |
|------------------------|----|
| 绪 论 | 3 |
| 第 1 章 热力学基本知识 | 3 |
| 1.1 工质的性质 | 3 |
| 1.1.1 工质和体系 | 3 |
| 1.1.2 状 态 | 4 |
| 1.1.3 气体的基本状态参数 | 4 |
| 1.1.4 理想气体 | 8 |
| 1.1.5 理想气体状态方程式 | 9 |
| 1.1.6 水蒸气 | 9 |
| 1.1.7 湿空气和相对湿度 | 11 |
| 1.2 热力学第一定律及热力过程 | 13 |
| 1.2.1 热力学第一定律 | 13 |
| 1.2.2 闭口体系的热力学第一定律表达式 | 13 |
| 1.2.3 热力过程 | 16 |
| 1.3 气体的流动过程 | 18 |
| 1.3.1 基本方程式 | 18 |
| 1.3.2 声速和马赫数 | 22 |
| 1.3.3 管道截面积和流速的关系 | 23 |
| 1.3.4 典型流动过程 | 25 |
| 1.4 热力学第二定律及动力循环 | 28 |
| 1.4.1 热力循环 | 28 |
| 1.4.2 热力学第二定律 | 30 |
| 1.4.3 活塞式发动机的定容加热循环 | 31 |
| 1.4.4 燃气涡轮发动机的定压加热循环 | 32 |
| 复 习 题 | 34 |
| 第 2 章 活塞式航空发动机的组成和工作原理 | 36 |
| 2.1 活塞式航空发动机的类型 | 36 |
| 2.1.1 直列式发动机 | 36 |
| 2.1.2 星形发动机 | 37 |



| | | |
|------------|-----------------|----|
| 2.2 | 活塞式航空发动机的组成 | 37 |
| 2.2.1 | 基本组件 | 37 |
| 2.2.2 | 工作系统 | 38 |
| 2.3 | 活塞式航空发动机的基本工作原理 | 39 |
| 2.3.1 | 进气冲程和充填系数 | 40 |
| 2.3.2 | 压缩冲程和压缩比 | 41 |
| 2.3.3 | 膨胀冲程 | 41 |
| 2.3.4 | 排气冲程 | 41 |
| 2.4 | 气门定时 | 43 |
| 2.4.1 | 气门机构 | 43 |
| 2.4.2 | 气门定时分析 | 44 |
| 2.4.3 | 有效曲轴角 | 45 |
| 2.5 | 汽缸中的燃烧 | 46 |
| 2.5.1 | 余气系数和油气比 | 46 |
| 2.5.2 | 正常燃烧和非正常燃烧 | 47 |
| 2.5.3 | 过贫油和过富油时的燃烧 | 47 |
| 2.5.4 | 爆燃 | 49 |
| 2.5.5 | 早燃 | 53 |
| 2.6 | 增压发动机 | 55 |
| 2.6.1 | 传动式增压发动机 | 55 |
| 2.6.2 | 废气涡轮增压发动机 | 56 |
| 2.6.3 | 两种增压系统的比较 | 57 |
| | 复 习 题 | 58 |
| 第3章 | 点火系统与启动 | |
| 3.1 | 点火系统的组成 | 60 |
| 3.2 | 磁电机的工作原理 | 61 |
| 3.2.1 | 基本磁场的变化和低压电流的产生 | 62 |
| 3.2.2 | 高压电的产生 | 63 |
| 3.2.3 | 高压电的分配 | 64 |
| 3.2.4 | 磁电机的控制和点火开关的使用 | 64 |
| 3.3 | 火花塞 | 65 |
| 3.3.1 | 火花塞的结构与工作 | 66 |
| 3.3.2 | 影响火花塞工作的因素 | 66 |
| 3.4 | 启动机 | 67 |



| | | |
|-------------------|---------------------|----|
| 88 | 3.5 发动机启动时高压电的产生 | 68 |
| 88 | 3.5.1 启动线圈 | 68 |
| 88 | 3.5.2 启动振荡器 | 68 |
| 88 | 3.5.3 冲击联轴器 | 69 |
| 88 | 复 习 题 | 69 |
| 第 4 章 燃油系统 | | |
| 10 | 4.1 两种燃油系统 | 70 |
| 10 | 4.1.1 化油器式燃油系统 | 70 |
| 10 | 4.1.2 喷油式燃油系统 | 72 |
| 20 | 4.2 化油器 | 74 |
| 20 | 4.2.1 化油器的基本组成和工作原理 | 74 |
| 20 | 4.2.2 浮子式化油器的辅助装置 | 75 |
| | 4.2.3 各种飞行姿态下的油气比调节 | 77 |
| 10 | 4.2.4 化油器结冰和防冰 | 79 |
| 10 | 4.3 喷油系统 | 81 |
| 10 | 4.4 油 品 | 82 |
| 10 | 4.5 燃油的使用和管理 | 83 |
| 20 | 4.5.1 航空汽油的要求 | 83 |
| 20 | 4.5.2 燃油使用和管理 | 83 |
| 80 | 复 习 题 | 85 |
| 第 5 章 滑油系统 | | |
| 70 | 5.1 滑油系统的功用 | 87 |
| 70 | 5.1.1 润 滑 | 87 |
| 70 | 5.1.2 冷 却 | 87 |
| 80 | 5.1.3 净 化 | 87 |
| | 5.1.4 防腐蚀 | 87 |
| 00 | 5.1.5 密 封 | 87 |
| 001 | 5.1.6 缓 冲 | 87 |
| 001 | 5.1.7 变 矩 | 88 |
| 001 | 5.2 滑油的性质 | 88 |
| 201 | 5.2.1 粘 性 | 88 |
| 201 | 5.2.2 闪 点 | 88 |
| 201 | 5.2.3 稳 定 性 | 88 |
| 201 | 5.3 发动机的润滑方式 | 88 |

| | | | |
|----|--------------|-------------------|-----|
| 88 | 5.3.1 | 飞溅润滑 | 88 |
| 88 | 5.3.2 | 压力润滑 | 89 |
| 88 | 5.3.3 | 喷射润滑 | 89 |
| 88 | 5.4 | 滑油系统的组成和工作原理 | 89 |
| 88 | 5.4.1 | 湿机匣滑油系统 | 89 |
| | 5.4.2 | 干机匣滑油系统 | 90 |
| 88 | 5.5 | 滑油系统的监控 | 91 |
| 88 | 5.5.1 | 滑油消耗 | 91 |
| 88 | 5.5.2 | 滑油温度 | 91 |
| 88 | 5.5.3 | 滑油压力 | 92 |
| 88 | 5.6 | 定期更换滑油 | 92 |
| 88 | | 复 习 题 | 92 |
| | 第 6 章 | 冷却系统 | |
| 88 | 6.1 | 基本知识 | 94 |
| 88 | 6.1.1 | 导 热 | 94 |
| 88 | 6.1.2 | 对流换热 | 94 |
| 88 | 6.1.3 | 辐射换热 | 94 |
| 88 | 6.2 | 气冷式冷却系统 | 95 |
| 88 | 6.2.1 | 散热片 | 95 |
| 88 | 6.2.2 | 导风板 | 96 |
| | 6.2.3 | 整流罩和风门 | 96 |
| 88 | 6.3 | 影响汽缸温度的因素和汽缸温度的调节 | 97 |
| 88 | 6.3.1 | 影响汽缸温度的因素 | 97 |
| 88 | 6.3.2 | 利用风门调节汽缸温度 | 97 |
| 88 | | 复 习 题 | 98 |
| | 第 7 章 | 螺旋桨 | |
| 88 | 7.1 | 基本知识 | 99 |
| 88 | 7.1.1 | 桨叶角 | 100 |
| 88 | 7.1.2 | 旋转速度 | 100 |
| 88 | 7.1.3 | 叶剖面的螺旋运动与攻角 | 100 |
| 88 | 7.1.4 | 桨叶扭转 | 102 |
| 88 | 7.1.5 | 桨距与滑移 | 102 |
| 88 | 7.1.6 | 螺旋桨效率 | 103 |
| 88 | 7.1.7 | 有效桨叶剖面 | 103 |



| | | |
|--------------------------|----------------|-----|
| 7.1.8 | 桨叶的拉力和阻力 | 104 |
| 7.2 | 变距(恒速)螺旋桨 | 104 |
| 7.2.1 | 定距螺旋桨 | 104 |
| 7.2.2 | 变距(恒速)螺旋桨分析 | 105 |
| 7.2.3 | 变距的功能 | 106 |
| 7.2.4 | 变距螺旋桨的缺点 | 108 |
| 7.3 | 变距机构 | 108 |
| 7.3.1 | 作用在桨叶上的扭转力矩 | 108 |
| 7.3.2 | 变距系统 | 109 |
| 7.3.3 | McCauley 型变距机构 | 111 |
| 7.3.4 | Hartzell 型变距机构 | 111 |
| 7.4 | 调速器 | 113 |
| 7.4.1 | 工作原理 | 113 |
| 7.4.2 | 转速调节 | 114 |
| 7.5 | 变距系统的检查 | 115 |
| 7.6 | 螺旋桨的故障 | 115 |
| 7.6.1 | 螺旋桨超转 | 115 |
| 7.6.2 | 螺旋桨振动 | 116 |
| 7.6.3 | 风车状态 | 116 |
| 7.6.4 | 螺旋桨疲劳 | 117 |
| 7.7 | 双向作用变距机构 | 117 |
| | 复 习 题 | 118 |
| 第 8 章 活塞式航空发动机的性能 | | |
| 8.1 | 发动机的主要性能 | 120 |
| 8.1.1 | 作功能力 | 120 |
| 8.1.2 | 经济性 | 122 |
| 8.2 | 发动机的主要工作状态 | 123 |
| 8.2.1 | 额定工作状态 | 123 |
| 8.2.2 | 起飞工作状态 | 123 |
| 8.2.3 | 最大连续工作状态 | 124 |
| 8.2.4 | 巡航工作状态 | 124 |
| 8.2.5 | 慢车工作状态 | 124 |
| 8.3 | 油气比对发动机性能的影响 | 124 |
| 8.3.1 | 油气比对燃烧的影响 | 124 |



| | | | |
|-------------------------|-------|---------------|-------|
| 801 | 8.3.2 | 油气比对发动机性能的影响 | 125 |
| 101 | 8.4 | 飞行高度对发动机性能的影响 | 127 |
| 801 | 8.4.1 | 基本知识 | 127 |
| 601 | 8.4.2 | 高度对发动机性能的影响 | 128 |
| 801 | 8.5 | 发动机性能数据表 | 129 |
| 801 | 8.5.1 | 基本知识 | 129 |
| 801 | 8.5.2 | 发动机性能表 | 130 |
| 801 | | 复 习 题 | 133 |
| 第 9 章 动力装置的操作与控制 | | | |
| 111 | 9.1 | 发动机启动 | 135 |
| 111 | 9.1.1 | 启动前的准备 | 135 |
| 811 | 9.1.2 | 启动过程 | 135 |
| 811 | 9.1.3 | 冷发和热发启动 | 136 |
| 111 | 9.2 | 发动机停车 | 136 |
| 811 | 9.3 | 发动机试车 | 136 |
| 811 | 9.4 | 变距桨发动机的功率设置 | 137 |
| 111 | 9.4.1 | 设置功率的原则 | 138 |
| 811 | 9.4.2 | 不同飞行阶段的功率设置 | 139 |
| 111 | 9.5 | 发动机操控中的注意事项 | 139 |
| 111 | 9.6 | 发动机不平稳运转的原因 | 140 |
| 111 | | 复 习 题 | 141 |
| 附录 中英文词汇对照表 | | | |
| 1201 | | 活塞式航空动力装置 | 1.8 |
| 120 | | 活塞式 | 1.1.8 |
| 1221 | | 活塞式 | 1.1.8 |
| 123 | | 活塞式的主要性能 | 1.8 |
| 1231 | | 活塞式的主要性能 | 1.8.8 |
| 123 | | 活塞式的主要性能 | 1.8.8 |
| 1231 | | 活塞式的主要性能 | 1.8.8 |
| 124 | | 活塞式的主要性能 | 1.8.8 |
| 1241 | | 活塞式的主要性能 | 1.8.8 |
| 124 | | 活塞式的主要性能 | 1.8.8 |
| 1241 | | 活塞式的主要性能 | 1.8.8 |
| 124 | | 活塞式的主要性能 | 1.8.8 |
| 1241 | | 活塞式的主要性能 | 1.8.8 |

绪 论

自古以来,人类就怀有在空中像鸟一样自由飞翔的梦想,各种美妙的传说和神话表达了人们对实现梦想的强烈追求和向往,不少先驱者为此作过许多勇敢的探索,虽然历经许多挫折和失败,却为人类实现伟大的梦想积累了重要经验。

活塞式内燃机的出现为人类能够在空中自由飞翔提供了条件。

活塞式内燃机是一种将热能转换为机械功的动力机械。相传人类对于热能的利用始于远古时的钻木取火。经历了漫长的岁月,人类在生活和生产中对于热的认识和利用,从取暖、烧制食物,到打造金属工具,不断地发现和创造。在12世纪到13世纪间,我国就有雏形气轮机——走马灯和使用火药使雏形火箭飞上天的记载,它们与现代燃气轮机和火箭推进器具有相同的工作原理。

自古以来,人类使用的动力主要是人力、畜力以及风力和水力等自然动力。随着人类社会的不断发展,人们迫切要求解决生产中动力不足的问题。通过长期努力,人类对于热的本质的认识和利用有了很大进步,18世纪发明了蒸汽机。这是人类最早使用的一种热力发动机,从而开始了利用热机为动力的新纪元。蒸汽机在工业生产上的广泛使用,促进了社会生产力的迅速发展。

蒸汽机是利用燃料在锅炉中燃烧,从外部向工质供热使工质作功的外燃机,其结构笨重、热效率低,不适合作为飞机的动力装置。经过近300年的发展和研究,卡诺、迈耶、焦耳等伟大科学家建立了完整的热力学体系,推动了热机事业的不断发展。19世纪末,出现了燃料在汽缸中燃烧,从内部向工质加热并使工质对外作功的内燃机;特别是1893年汽油活塞式发动机的问世,使人类实现空中飞翔的理想成为可能。

1903年2月17日美国人莱特兄弟成功驾驶“飞行者”1号飞上天,实现了人类第一次装有动力、持续、可操纵的飞行,其最大飞行距离为260 m,留空时间为59 s,从而开创了现代航空事业的新纪元。冯如是我国航空史上的开拓者,是我国第一架飞机的设计师、飞机制造家和飞行家。他于1909年9月制成我国第一架载人动力单翼机,1910年7月制成第七架双翼机,并于1911年初创造了当时航空飞行新纪录——时速105 km/h,航程35 km,飞行高度210 m。

自1903年人类第一架飞机升空至第二次世界大战末期,几乎所有飞机都使用汽油活塞式发动机和螺旋桨作为动力装置。第一次世界大战肯定了飞机在战争中的作用及其多种重要用途,促进了航空科学技术和航空工业的发展,尤其是促进了民用航空运输业的发展,发动机的性能取得了长足进步。例如,1937年苏联生产的“安特25”型飞机由莫斯科直飞美国;1938年飞机的升限纪录最高达17 094 m;1939年创造了755.09 km/h的航速纪录。第二次世界大战

期间,飞机得到更加广泛的使用;飞机种类大大增多;飞行速度明显提高,最高飞行速度接近了活塞飞机习行速度的速度极限。

当飞行速度接近声速时,飞机的气动阻力将急剧增大,使用活塞式动力装置难以提供足够的拉力,从而给提高航速造成了障碍,人们称此种现象为“声障”。要想突破“声障”,飞机的动力装置必须能够提供足够的拉力(或推力),涡轮喷气式发动机的出现使此问题得到解决。

喷气式航空动力装置是继活塞式航空动力装置之后的又一种广泛使用的飞机动力装置。1939年,第一架装有涡轮喷气动力装置的 He-178 型飞机在德国试飞成功,继而在英国、美国、苏联等国家陆续发展了装有喷气动力装置的战斗机和轰炸机。第二次世界大战后,喷气动力装置逐渐成为军机的主要动力。20世纪50年代出现了超声速军用飞机。民航飞机使用喷气动力装置比军用飞机稍晚,20世纪50年代末,出现了多种型号的喷气式客机。当前,喷气式客机已担当起世界空中客货运输的主要角色。

然而,活塞式航空动力装置现今仍有许多重要用途,诸如飞行员飞行技术培训使用的教练机、施肥和灭虫用的农业机、灭火救生用的直升机、公务和旅游用的轻型客机、特技飞行和货物运输用的各种飞机等,仍须使用活塞式动力装置。以国内外民航学院培养飞行员的计划为例,学生在毕业前应有 250~300 飞行小时的飞行纪录,其中 90% 的飞行小时要在装有活塞式动力装置的初级和高级教练机上完成。航空事业的飞速发展,对活塞式航空动力装置的性能、结构、适用性、可靠性等不断提出新的、更高的要求,和喷气动力装置相似,活塞式动力装置具有广阔的发展前途。

本书以教练机使用的活塞式航空动力装置所需的专业知识作为主要内容,其中包括活塞式发动机的基本组件和工作原理、附属工作系统、螺旋桨及其变距、发动机性能和动力装置的操控等;书中的热力学基本知识用以帮助学生深入理解专业知识。书中列出精选的复习题涵盖了学生应当掌握的知识。为便于学生学习专业英语,书中还列出了本学科的重要词汇中英文对照表。

本书是民航飞行技术专业必修课的教材,学好本专业课后是后续飞行训练、获取驾驶执照的必备条件,亦为以后不断提高专业技术水平打好必要的理论基础。

第 1 章 热力学基本知识

本章讲述常用的热力学基本概念、基本定律、工质性质、热力学过程和循环等知识,以及有关物理量的单位。

1.1 工质的性质

1.1.1 工质和体系

任何动力装置,都要使用媒介物质进行能量的转换,该媒介物质称为工作物质,简称工质。航空动力装置中常见的工质为空气和燃气。

在分析问题时,常把研究对象从周围物体分割出来,考查它通过分界面和周围物体之间的能量转换。这种被人为分割出来的研究对象叫做热力学体系,简称体系;与其发生作用,但不属于研究对象的周围物体,叫做外界;体系和外界之间的分界面叫做边界。边界可以是真实可见的,也可以是假想的;可以是固定、静止的,也可以是变化、运动的。例如,当取图 1-1(a)所示的活塞式发动机汽缸中的工质(燃气)作为热力学体系时,在外界向工质定容加热过程中,工质和汽缸之间的边界是真实而固定不动的,如图中的虚线所示;当工质膨胀做功时,由于活塞移动,此过程中的边界是真实而变化的。再例如,当取图 1-1(b)所示的喷气式发动机的叶轮机(或燃烧室)中的工质作为体系时,工质(空气或燃气)与通道之间存在实际边界,而进口截面 1-1 前和出口截面 2-2 前后的工质不存在实际边界,则进、出口截面 1-1 和 2-2 是假想边界。

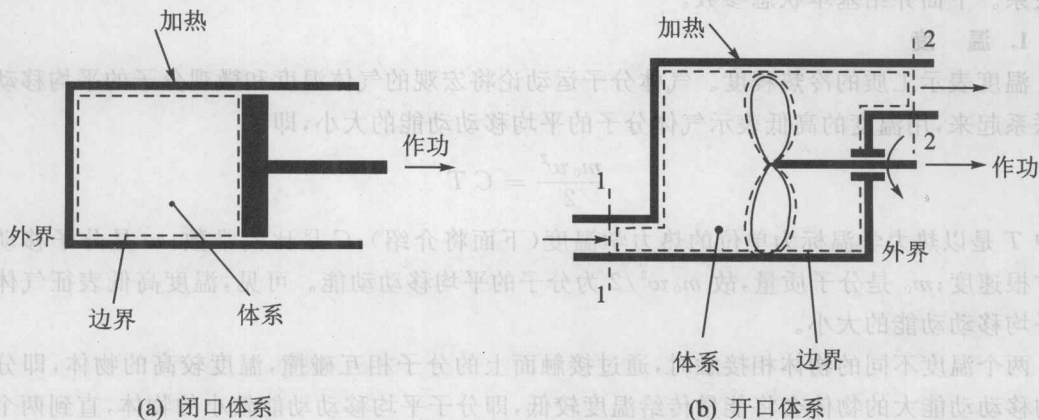


图 1-1 体系与外界示意

体系与外界之间可以进行能量或质量交换。与外界之间有热量和功量等能量交换,但无质量交换的体系叫做闭口体系,如图 1-1(a)所示;与外界之间不但有热量和功量等能量交换,而且还有物质交换的体系叫做开口体系,如图 1-1(b)所示。体系和外界之间没有热量交换的体系叫做绝热体系。若体系和外界既没有热量和功量的交换,又没有质量的交换,这样的体系叫做孤立体系。

1.1.2 状态

在某一瞬间,热力学体系所处的宏观状态,或者说热力学体系所具有的物理特性的总标志,即称为热力学状态,简称状态。描写宏观体系的物理量有温度、压力、密度等,这些物理量叫做状态参数。

热力学状态有平衡状态和不(非)平衡状态两种。平衡状态必须满足热平衡、力平衡和化学平衡。以闭口体系为例,热平衡指的是体系内部的温度均匀一致;力平衡指的是体系内部的压力均匀一致;化学平衡指的是体系内各部分之间不发生化学反应和质量浓度梯度引起的分子扩散。满足热平衡、力平衡和化学平衡的热力学状态,叫做平衡状态,否则就叫做不平衡状态。

如果体系因外界变化而受到干扰,就会破坏体系的平衡。但是,由于工质分子运动,体系会自动地由不平衡状态过渡到平衡状态。对于气态工质,由于分子运动十分迅速,完成由不平衡状态过渡到平衡状态所需的时间极为短促,所以,气态工质可以视为随时处于平衡状态的体系。

1.1.3 气体的基本状态参数

描述气体状态的物理量较多,常用的温度、压力和密度的意义明确而直观可测,故称为基本状态参数。此外还有内能、焓和熵等状态参数,这些状态参数与基本状态参数均有确定的函数关系。下面介绍基本状态参数。

1. 温度

温度表示工质的冷热程度。气体分子运动论将宏观的气体温度和微观分子的平均移动动能联系起来,用温度的高低表示气体分子的平均移动动能的大小,即

$$\frac{m_0 \omega^2}{2} = C T$$

式中 T 是以热力学温标为单位的热力学温度(下面将介绍); C 是比例常数; ω 是分子移动的均方根速度; m_0 是分子质量,故 $m_0 \omega^2 / 2$ 为分子的平均移动动能。可见,温度高低表征气体分子平均移动动能的大小。

两个温度不同的物体相接触时,通过接触面上的分子相互碰撞,温度较高的物体,即分子平均移动动能大的物体会将能量传给温度较低,即分子平均移动动能较小的物体,直到两个物体的分子平均移动动能相等,也就是两个物体的温度相等为止,从而达到热平衡状态。



利用温度计可以测量物体的温度。将温度计与被测物体接触,达到热平衡状态时,由温度计的指示值可知被测物体的温度。凡是随冷热程度的变化而发生显著变化的物理量,均可以作为建立温度计的温度标志,例如水银温度计就是利用水银柱高度随温度变化测量温度的温度计;电阻温度计就是利用金属丝的电阻随温度变化测量温度的温度计。

温度测量需要有温度的数值表示法,即需要建立温度标尺,温度的标尺称为温标。目前在航空工程界常用摄氏温标和华氏温标。摄氏温标规定在标准大气压力下,纯水的冰点是 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 纯水的沸点为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, “ $^{\circ}\text{C}$ ”是摄氏温标的单位符号;华氏温标为英制温标,它规定标准大气压力下纯水的冰点和沸点分别为 $32\text{ }^{\circ}\text{F}$ 和 $212\text{ }^{\circ}\text{F}$, “ $^{\circ}\text{F}$ ”是华氏温标的单位符号。纯水的冰点和沸点之间的温度值按温度计所用液体的液柱高度的线性函数来确定。若以 t_{F} 和 t 分别表示华氏温度和摄氏温度,华氏温标和摄氏温标的换算关系为

$$t_{\text{F}}/^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5}t/^{\circ}\text{C} + 32$$

由于温度计选用的测温物质不同,作为温度标志的物理量不同,故所定的温标除在纯水的冰点与沸点相同外,其他温度往往存在较小的差异。根据热力学第二定律的原理制定的热力学温标,与测温物质的性质无关,可以作为度量温度的共同标准,从而可以提高温度测量的精确度。1960年第十一次国际计量大会上规定热力学温标作为测量温度的最基本温标。国际单位制(SI)中采用热力学温标。该温标又称绝对温标或开尔文温标,温度符号为 T ,单位叫开[尔文],简称开,单位符号为 K 。

热力学温标规定水的三相点温度为 273.16 K ,因此,热力学温度单位开尔文是水的三相点温度的 $1/273.16$ 。所谓三相点温度,是指水的固相、液相和气相平衡共存状态时的温度。水的三相点温度比水的冰点温度高 0.01 K ,所以水的冰点温度在热力学温标中为 273.15 K 。在摄氏温标中,水的冰点温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,所以,热力学温标(T)和摄氏温标(t)具有如下关系:

$$t/^{\circ}\text{C} = T/\text{K} - 273.15$$

或

$$T/\text{K} = t/^{\circ}\text{C} + 273.15$$

这是1960年第十一次国际计量大会对摄氏温标所给予的新定义,它是从热力学温标换算出来的,并给以全名为热力学摄氏温标。

选取水的三相点为参考点比选水的冰点为参考点有两个好处:一是实验装置中的三相点的温度比较容易稳定,可长期维持在万分之一度内不变;二是三相点不牵涉到外界条件,如大气压等。

2. 压 力

垂直作用在单位面积上的力,称为压力或压强,以符号 p 表示。气体的压力是气体分子作不规则运动时频繁撞击容器内壁的平均总结果。

压力的测量常使用弹簧式压力计、压电式压力计等。测量小压力值时多使用U形管压力计,如图1-2所示。

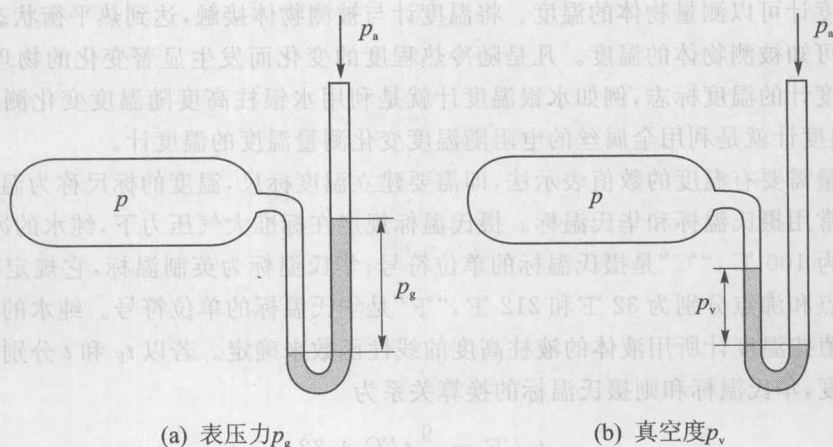


图 1-2 U 形管压力计

在 U 形管压力计中装有水银或酒精,通过两端液面高度差确定被测气体的压力。由于压力计处于大气压力 p_a 的作用下,因此,测得的压力为被测物质的真实压力(又称绝对压力) p 与大气压力 p_a 之差,叫做表压力 p_g ,所以真实压力的确定存在两种情况:

当绝对压力高于大气压力时,如图 1-2(a)所示,则

$$p = p_g + p_a$$

当绝对压力低于大气压力时,如图 1-2(b)所示,则

$$p = p_a - p_v$$

式中 p_v 表示被测物质的绝对压力与大气压力的差值,叫做真空度。这种能够指示真空度的仪表称为真空表。绝对压力、表压力、真空度和大气压力的关系如图 1-3 所示。

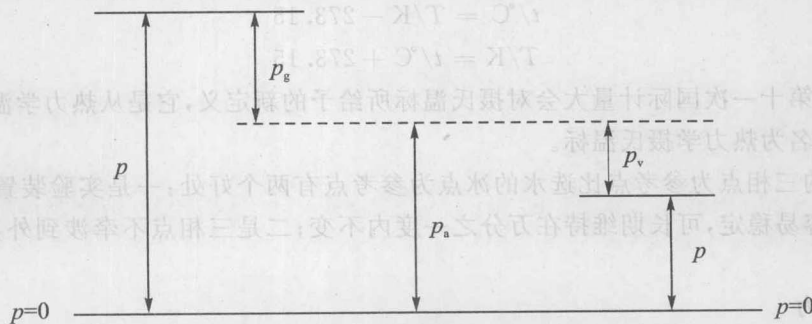


图 1-3 p 、 p_a 、 p_g 、 p_v 的关系

绝对压力是工质状态参数,只要工质的状态一定,绝对压力就是一定的。由于大气压力随地面高度和气候条件而变化,即使绝对压力不变,表压力和真空度仍可变化。大气压力可用大



气压力表测定。在进行工质压力测定时,必须同时测定当地当时的大气压力,才能获得工质的真实压力值。

如果气体作用于器壁表面积 S 上的垂直作用力为 F ,根据压力的定义,则该壁面上的压力为

$$p = \frac{F}{S}$$

从而可以确定压力的单位。

在国际单位制(SI)中,力的单位是牛[顿](简称牛),符号为 N;面积单位是平方米,符号为 m^2 ,所以压力的 SI 单位是牛/米²(N/m^2),并定名为帕斯卡,简称帕,以符号 Pa 表示,即

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

在工程实用中,由于帕单位太小,常使用千帕(kPa)或兆帕(MPa)作为压力单位,即

$$1 \text{ kPa} = 10^3 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$$

目前与 SI 压力单位并用的压力单位还有巴(bar),而且

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 0.1 \text{ MPa}$$

压力的大小还常使用汞柱或水柱的高度来表示(如图 1-2 所示)。根据液体静压力由液柱重量而产生的原理,参照图 1-4,作用在液柱底面积 S 上的总作用力 F 应为该液柱的重量,即

$$F = HS\gamma$$

式中 H 为液柱高度, γ 为液体的重度(N/m^3),从而得作用于底面上的压力为

$$p = \frac{F}{S} = H\gamma$$

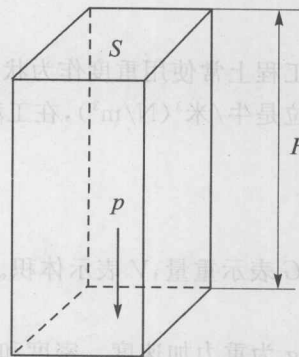


图 1-4 液柱高度表示压力

常常使用标准大气压(atm)的概念。标准大气压亦称物理大气压,它是在纬度为 45° 、大气温度为 0°C 的海平面上的大气常年平均压力,通过气压计测定 1 个物理大气压为 760 mm 汞柱高,即

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg}$$

若把物理大气压换算成 SI 中的压力单位,由于 $1 \text{ mmHg} = 133.32 \text{ Pa}$,则

$$1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa} = 1.013 \text{ bar}$$

工程单位制中使用工程大气压(at)作为压力单位,由于该单位制中力的单位是千克力(kgf),于是其压力单位是千克力/米²(kgf/m^2),由于此单位太小,多使用千克力/厘米²(kgf/cm^2)作为实用单位,因而

$1 \text{ kgf/cm}^2 = 10^4 \text{ kgf/m}^2$