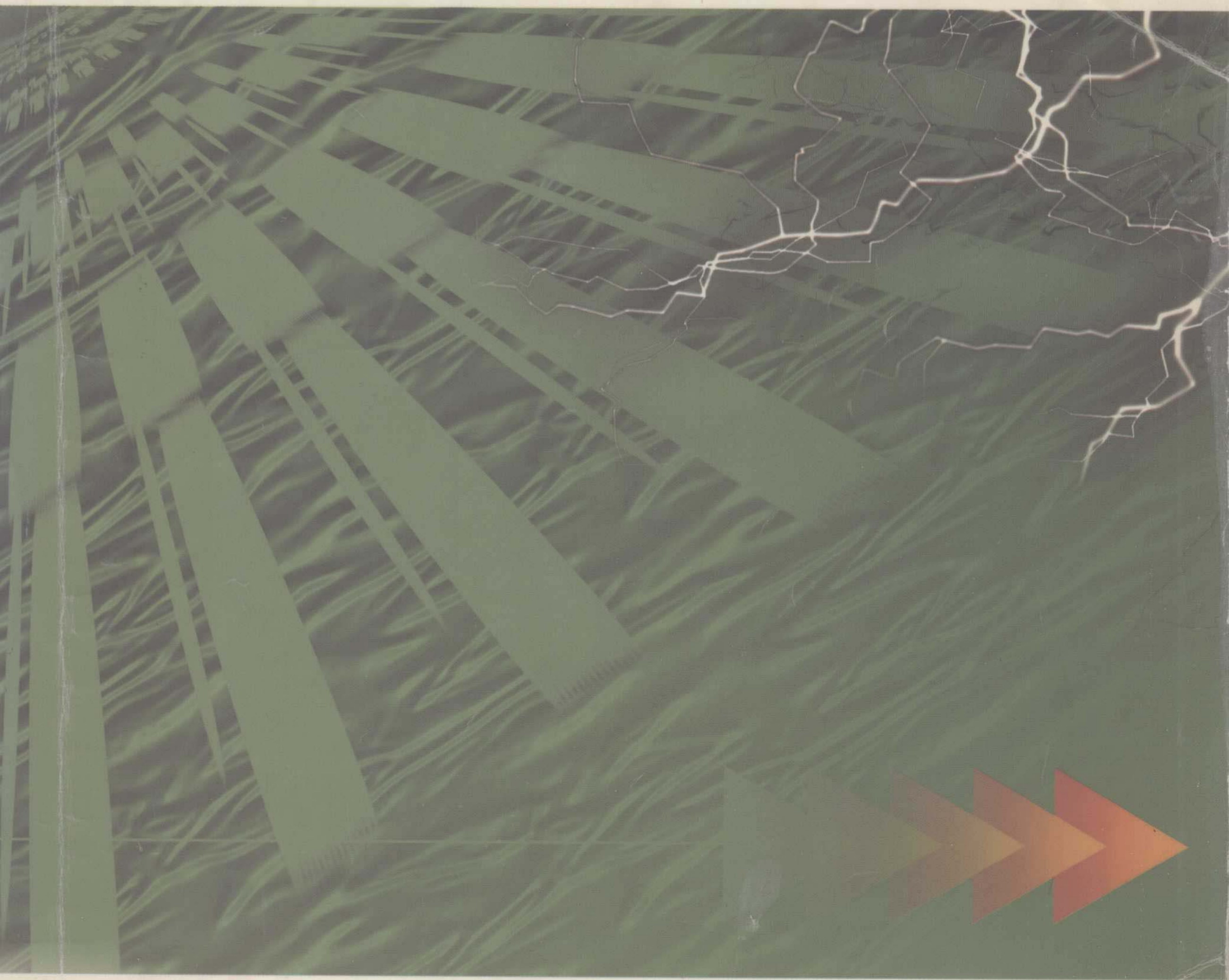



教育部高职高专教育教学改革试点专业教材

工程热力学与传热学

陈爱玲 主编

郭祖平 主审



 大连海事大学出版社

教育部高职高专教育教学改革试点专业教材

工程热力学与传热学

陈爱玲 主编

郭祖平 主审

大连海事大学出版社

© 陈爱玲 2005

图书在版编目 (CIP) 数据

工程热力学与传热学 / 陈爱玲主编 .—大连 : 大连海事大学出版社, 2005. 5
ISBN 7-5632-1856-4

I. 工… II. 陈… III. ①工程热力学 ②工程传热学 IV. TK12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 036286 号

大连海事大学出版社出版

地址: 大连市凌水桥 邮政编码: 116026 电话: 0411-84728394 传真: 0411-84727996

<http://www.dmupress.com> E-mail: cbs@dmupress.com

普兰店市第一印刷厂印装 大连海事大学出版社发行

2005 年 6 月第 1 版 2005 年 6 月第 1 次印刷

幅面尺寸: 185 mm×260 mm 印张: 12.75

字数: 312 千字 印数: 1~1500 册

责任编辑: 史洪源 王在凤 版式设计: 海 韵

封面设计: 王 艳 责任校对: 枫 叶

定价: 21.00 元

前 言

本书根据交通部科教司颁发的航海职业教育教学计划与教学大纲而编写,同时兼顾国家海事局最新颁发的《海船船员适任考试和评估大纲》。本书可以作为轮机管理专业专科和高职教育教材,也可用于海船轮机员考证培训和船员自学。

本书在编写中遵循能力本位和适度够用的主导思想,充分体现宽、浅、用、新的原则,避免过多的理论推导和计算,结合轮机专业特点增加实用性内容,有较强的科学性和先进性。

本书由青岛远洋船员学院陈爱玲主编,郭祖平主审。各章节分别由陈爱玲(第一章至第八章、及其他部分)、何昌伟(第九章至第十二章)、涂志平(第十四章、第十五章、各章复习题)、王名涌(第十六章、第十七章)、孙化栋(第十八章)编写。全书的统稿和修改定稿由陈爱玲完成。书中*号表示考证培训要求内容,学时少可以不讲。

本书在编写和出版过程中,得到了西安交通大学、大连海事大学、青岛远洋船员学院许多朋友的帮助和支持,有关教师提出了许多宝贵意见,在此谨向他们表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,书中不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者
2005年1月

目 录

第一篇 工程热力学

第一章 绪 论	1
第一节 热能利用及热力学发展简述	1
第二节 工程热力学的研究对象和主要内容	3
第二章 基本概念	7
第一节 工质、热力学系统	7
第二节 系统的热力状态和状态参数	8
第三节 状态方程与状态参数坐标图	12
第四节 热力过程及其描述	13
第五节 功和热量	15
第三章 热力学第一定律	18
第一节 热力学第一定律的实质、储存能量	18
第二节 封闭系统的热力学第一定律——内能	19
第三节 开口系统的热力学第一定律——焓	21
第四节 稳定流动能量方程的应用	25
第四章 热力学第二定律	29
第一节 热力循环	29
第二节 热力学第二定律	32
第三节 卡诺循环与卡诺定理	34
第四节 熵、熵增原理*	38
第五章 理想气体的热力性质	41
第一节 理想气体及其状态方程	41
第二节 理想气体的比热容	44
第三节 理想气体的内能和焓	48
第六章 理想气体的热力过程	52
第一节 研究过程的目的和方法	52
第二节 基本热力过程分析	52

第三节	多变过程	62
第七章	气体和蒸气的流动*	69
第一节	稳定流动的基本方程	69
第二节	喷管和扩压管的截面变化规律	70
第三节	喷管和扩压管在船上的应用	73
第八章	压缩机	75
第一节	单级活塞式压缩机的工作过程	75
第二节	容积效率和多级压缩	78
第三节	叶轮式压缩机	82
第九章	气体动力循环	86
第一节	柴油机实际循环和理想循环	86
第二节	定容加热理想循环和定压加热理想循环	91
第三节	提高柴油机功率的主要途径	93
第十章	水蒸气	96
第一节	基本概念	96
第二节	水蒸气定压发生过程	97
第三节	水蒸气表和 $h-s$ 图	102
第四节	水蒸气的基本热力过程*	103
第十一章	蒸气压缩制冷循环	107
第一节	制冷剂及 $p-h$ 图	107
第二节	蒸气压缩制冷循环	108
第三节	提高制冷循环经济性的途径	111
第十二章	湿空气	115
第一节	湿空气及其性质	115
第二节	湿空气的 $h-d$ 图	120
第三节	湿空气的热力过程*	123

第二篇 传热学

第十三章	导言	128
第十四章	导热	131
第一节	傅立叶定律和导热系数	131
第二节	平壁导热	134

第三节	圆筒壁导热	136
第十五章	对流换热	139
第一节	对流换热概念及公式	139
第二节	影响对流换热的因素	140
第十六章	辐射换热	144
第一节	热辐射的基本概念	144
第二节	热辐射的基本定律	146
第三节	辐射换热的增强与削弱*	149
第十七章	传热过程	150
第一节	传热过程及计算	150
第二节	强化传热与削弱传热	153
第十八章	换热器	158
第一节	换热器的类型	158
第二节	换热器的传热计算	162
附录		166
附表 1	气体的平均定压比热 c_{p0}^t (曲线关系)	166
附表 2	气体的平均定容比热 c_{v0}^t (曲线关系)	167
附表 3	饱和水与饱和蒸汽的热力性质 (按温度排列)	168
附表 4	饱和水与饱和蒸汽的热力性质 (按压力排列)	171
附表 5	未饱和水与过热水蒸汽的热力性质	173
主要符号		180
参考文献		182
附图 1	水蒸气 $h-s$ 图	183
附图 2	R12 压—焓图	184
附图 3	R22 压—焓图	185
附图 4	R134a 压焓图	186
附图 5	湿空气焓—湿图	187

第一篇 工程热力学

第一章 绪 论

本章简要介绍热能的利用、热力学的由来和典型能量转换装置的工作过程，以便于学生从宏观上了解工程热力学的研究对象、基本任务、主要内容和研究方法，使之在后续章节中能够联系实际进行热力学分析。

第一节 热能利用及热力学发展简述

一、热能及其利用

能源的开发和利用程度是人类社会生产发展的一个重要标志。所谓能源是指为生产和日常生活提供各种能量和动力的物质资源。目前，自然界中已为人们可利用的能源有水力能、风能、太阳能、地热能、燃料化学能、原子能等。在这些能源中，除水力能和风能是以机械能形式直接供给人们外，其余的各种能源往往直接以热能的形式，或通过相应的设备转换成热能供给人们。

热能的利用有两种基本方式：一种是直接利用热能加热物体，能量的形式不发生变化，如采暖、烘干、冶炼、蒸煮以及化工过程利用热能进行分解或化合等。这些直接加热过程，必须在加热设备或热交换器中进行。另一种是间接利用，通过热机（蒸汽机、蒸汽轮机、内燃机、燃气轮机、喷气发动机等）将热能转变为机械能或进一步转换为电能加以利用，如火力发电、交通运输及各种动力装置等。

热能通过热机转换为机械能的效率较低，早期蒸汽机的热效率只有 1%~2%，近代大型蒸汽动力发电装置的热效率也只有 35%~40%。因此，合理有效地实现热能与其他形式能量的转换、提高能源利用率是关系到社会和人类发展的重要课题。

二、热力学发展简史

热现象是人类最早接触到的自然现象之一。古代燧人氏的钻木取火，就是最简单的由机械能转换为热能的例子。中国在南宋时期（公元 1150 年左右）就有用火焰的热力来产生机械旋转运动的走马灯，以及使用火药燃烧后产生的喷气加速火箭飞行的记载。但是，

人类对热的认识形成一门科学却是近 300 年来的事。从观察和实验总结出来热现象的规律，构成热现象的宏观理论，从而诞生了热力学，然而在其发展过程中又常常超越了热的范围。最通常的热力学定义是：热力学是一门研究与热现象有关的能量、物质和它们之间相互作用规律的科学。

热力学是在研究如何提高热机的效率、制造性能更好的热机的基础上发展起来的。

18 世纪以前，人们对热只有一些粗略的概念，不可能建立正确的、科学的理论。从 1714 年法伦海特（Fahrenheit）建立华氏温标以后，热学才走上实验科学发展的道路。随着实验的进展，产生了一种可以简单解释实验结果的“热质学说”。这种学说认为热是一种能流动的没有质量的物质，称为热质，可以进入一切物体中，不生不灭；物体的热和冷决定于物体所含热质的多少。热质学说最明显的缺陷是不能解释大家熟知的摩擦生热现象，最终被科学界所抛弃。

与热质学说相对立，培根（Bacon）、罗蒙诺索夫（Lomonosov）等认为热是一种运动，是物质分子运动的表现，但是尚没有给出热是能量形式的明确结论。

1842 年，德国人迈耶（Mayer）提出能量守恒原理，认为热是能量的一种形式，可以和机械能互相转换，并从理论上算出了热功当量。

在此前后，焦耳（Joule）在与迈耶的理论研究毫无联系的情况下，通过大量的实验测定了热功当量值，得到了一致的结果，从而用实验证明了能量守恒定律。至此，能量守恒定律成为科学界公认的自然规律。热力学第一定律就是能量守恒定律在热能利用中的具体形式，后人公认迈耶和焦耳同为热力学第一定律的创立者。热力学第一定律的建立为热力学这门科学奠定了基础。

在热力学第一定律确立以前，法国工程师卡诺（Carnot）发表了关于热机效率的定理。1848 年开尔文（Kelvin）根据卡诺定理制定了热力学绝对温标（开尔文温标）。1850 年，克劳修斯（Clausius）在卡诺、迈耶和焦耳的思想基础上，确切地阐述了热力学两个基本定律，第一个给出了热力学第一定律的数量公式，建立了热量、功与内能之间相互联系的方程式。在阐述热力学第二定律时，引入了一个新的参量——熵。热力学第二定律关于一切自然过程方向性的论述意义透彻地表现在熵增原理之中。

几乎同时（1851 年）开尔文给出了热力学第二定律的另一种表述，同时建立了十分著名的能量散逸或贬值原理。这样热力学第一、第二定律奠定了热力学的理论基础。

热力学的建立与理论上所取得的成就大大促进了热力原动机的发展与性能的改善，到 19 世纪后半期，蒸汽机已不能满足工业生产发展的需要。19 世纪末，人们发明了汽轮机和内燃机，汽轮机成为现今火力发电厂的主要动力设备。汽轮机的出现促进了人们对蒸汽性质、蒸汽与气体的流动以及蒸汽动力循环的研究，内燃机则逐步成为汽车、飞机、船舶和机车等交通工具的主要原动机，并促进了对内燃机热力过程和热力循环的研究工作。进入 20 世纪以后，人们又发明了燃气轮机、喷气发动机；20 世纪 50 年代原子能动力装置的建成，为人类开辟了能源利用的新纪元。在热力原动机和热力工程的发展过程中，也使热力学逐步发展成一门成熟的具有广泛应用的基础学科。

热力学具有广阔的研究范围，可以说凡是涉及热现象的任何能量转换过程都是热力学的研究对象。运用热力学的基本理论研究某种领域或范围的能量转换热现象就构成了不同

方向的热力学，如研究大气流热现象的气象热力学、研究生物体内热现象的生物热力学、研究流体热力学性质的流体热力学、研究化学工艺过程中热现象的化工热力学、研究热机循环的发动机热力学等。工程热力学也是其中之一。

第二节 工程热力学的研究对象和主要内容

一、工程热力学的研究对象和基本任务

工程热力学是热力学的一个分支，它是从工程应用的角度研究热能与机械能之间相互转换的规律，并以提高能量有效利用为目的的学科。

凡是涉及热现象的过程、装置以及系统都是工程热力学的研究对象。由于热现象广泛地存在于各种工程问题之中，因此工程热力学的应用范围伸展到许多工程技术领域：不但用于热机、制冷、热泵和空气分离等传统工程中，而且应用于宇宙航行、海水淡化、防止环境污染和新能源开发等新技术领域中。因此，工程热力学已成为热能动力类专业所必修的一门重要技术基础课程。

工程热力学的基本任务就是通过对各种用能设备及系统中的能量转换过程及影响因素的研究，探索有效、合理利用能量的技术途径和基本方法。

二、典型能量转换装置简介

为了认识热能与机械能相互转换的规律，了解工程热力学的主要内容，首先扼要介绍能量转换装置的基本工作过程。

把热能转换为机械能的整套设备称为热能动力装置，其中有蒸汽动力装置、内燃机、燃气轮机装置以及喷气发动机等；而制冷、热泵和空气分离装置等，则属于机械能转换为热能的设备，为另一类能量转换装置。

1. 热能动力装置

(1) 往复式内燃机

以四冲程柴油机为例说明内燃机的工作过程。柴油机的主要部件为气缸、活塞、阀门、喷油嘴、曲轴和连杆等，如图 1-1 所示。开始活塞自上向下移动，进气阀打开，排气阀关

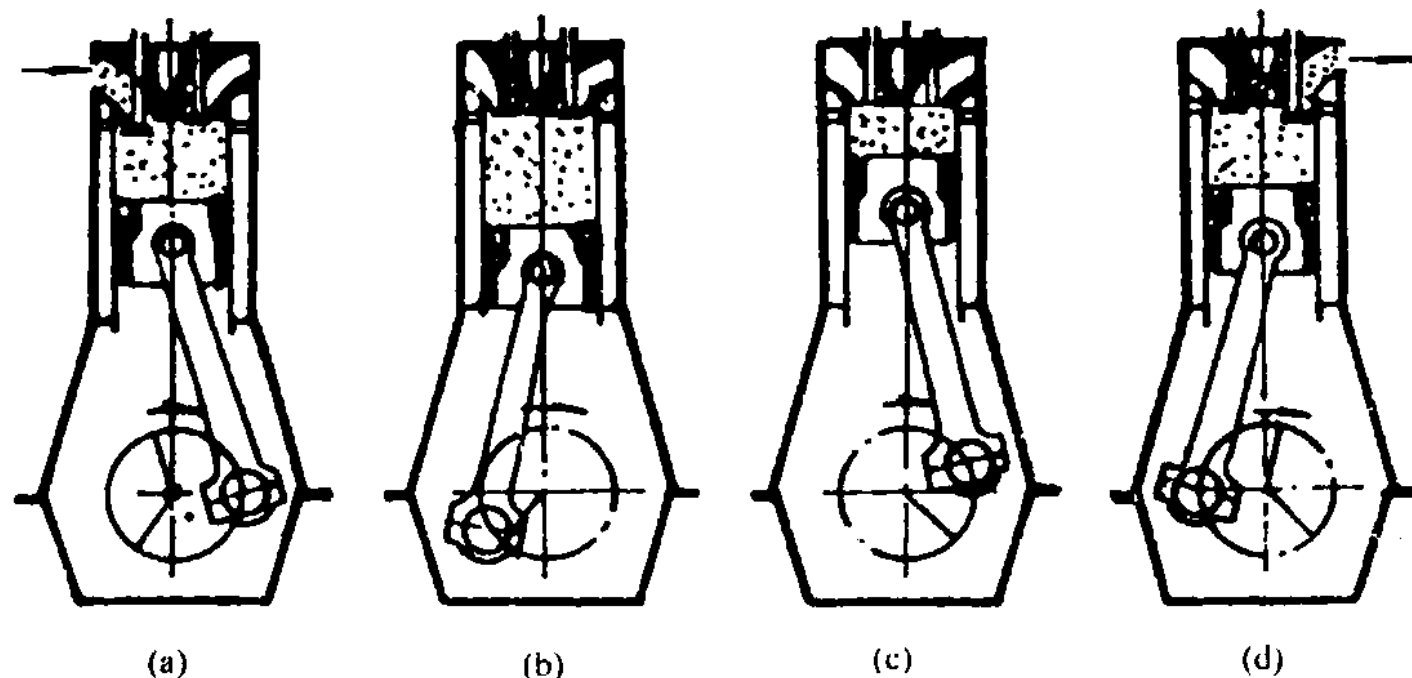


图 1-1 四冲程内燃机装置和工作原理示意图

(a)吸气冲程；(b)燃烧和膨胀冲程；(c)压缩冲程；(d)排气冲程

闭，新鲜空气被吸人气缸，此为吸气冲程；然后活塞向上移动，进、排气阀关闭，气缸内空气被压缩，其压力和温度升高，为压缩冲程；当活塞运动到上止点附近时，燃油从喷油嘴喷入气缸，遇到高温高压的空气迅速燃烧，释放出大量热能，使得燃烧形成的燃气的压力、温度急剧升高，发生膨胀，推动活塞往下运动而对外做功，此为燃烧和膨胀冲程；最后排气阀打开，活塞由下向上运动将做完功的废气排出气缸，完成排气冲程。然后又重新吸入空气，周而复始地完成上述四个冲程，使燃油燃烧释放的一部分热能转换为功，其余的热能则随废气排向大气。

(2) 蒸汽动力装置

最简单的蒸汽动力装置由锅炉、汽轮机、冷凝器和水泵组成，如图 1-2 (a) 所示。燃料在蒸汽锅炉的炉膛中燃烧，释放大量热能；水在锅炉中被加热，温度升高并转变为饱和蒸汽，进而成为过热蒸汽。这种高温、高压的过热蒸汽进入蒸汽轮机膨胀做功，蒸汽首先

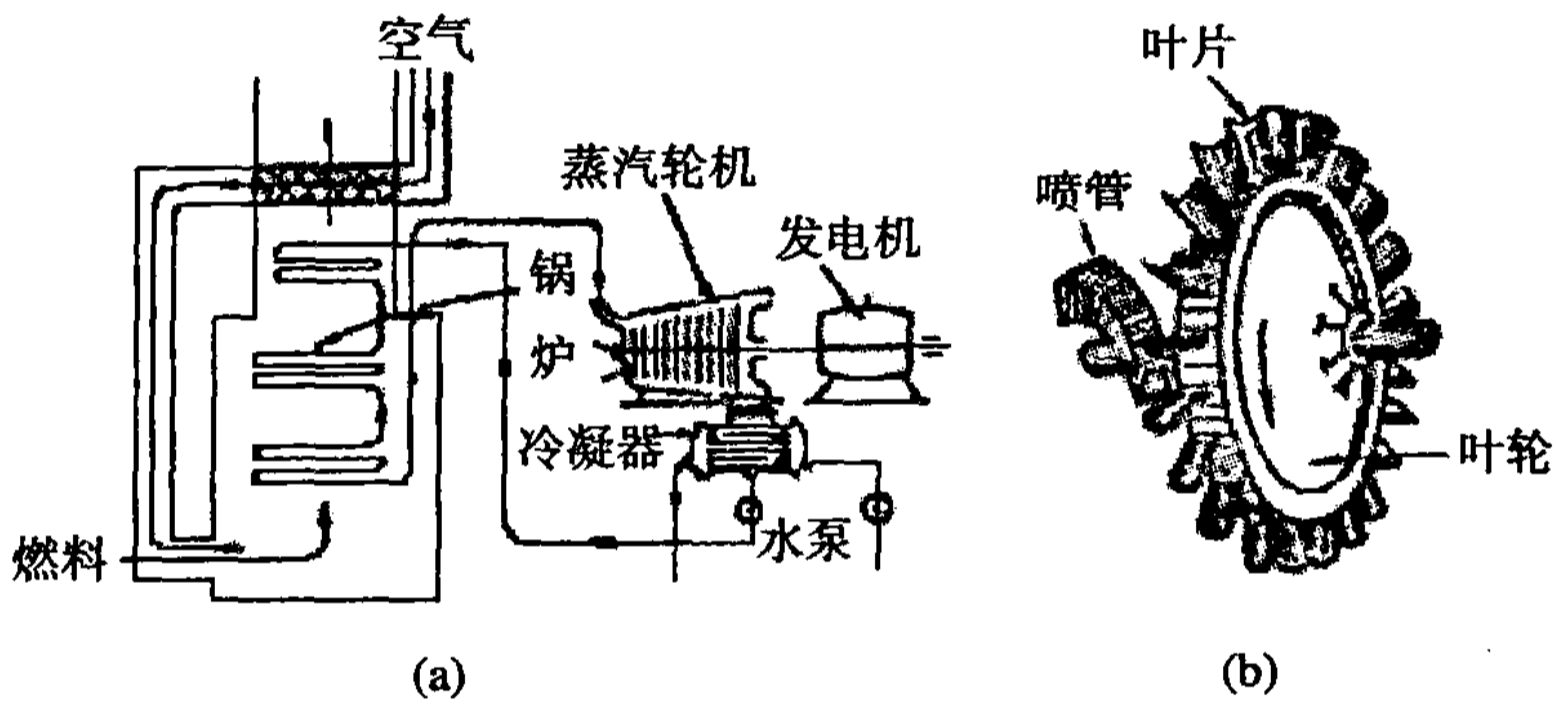


图 1-2 蒸汽动力装置

在喷管中膨胀，压力、温度降低，而汽流速度增加，热能转换成为汽流自身的动能；接着，高速汽流冲击叶片，带动叶轮旋转，汽流速度降低，即汽流的动能转化成为叶轮的机械能，通过旋转轴向外输出功量，如图 1-2

(b) 所示。由蒸汽轮机排出的废汽，压力、温度都比较低，进入冷凝器，放出大量的热而凝结成水；凝结水经水泵提高压力后又送回锅炉。如此周而复始地循环，把燃料燃烧所放出的热能源源不断地转换为功。

2. 制冷装置

制冷装置的类型有多种，常见的为蒸气压缩制冷装置。如图 1-3 所示，气态工质在压缩机中绝热压缩，压力、温度升高；接着进入冷凝器冷却并冷凝成液体，对外（环境大气或冷却水）放出热量；然后液态工质经

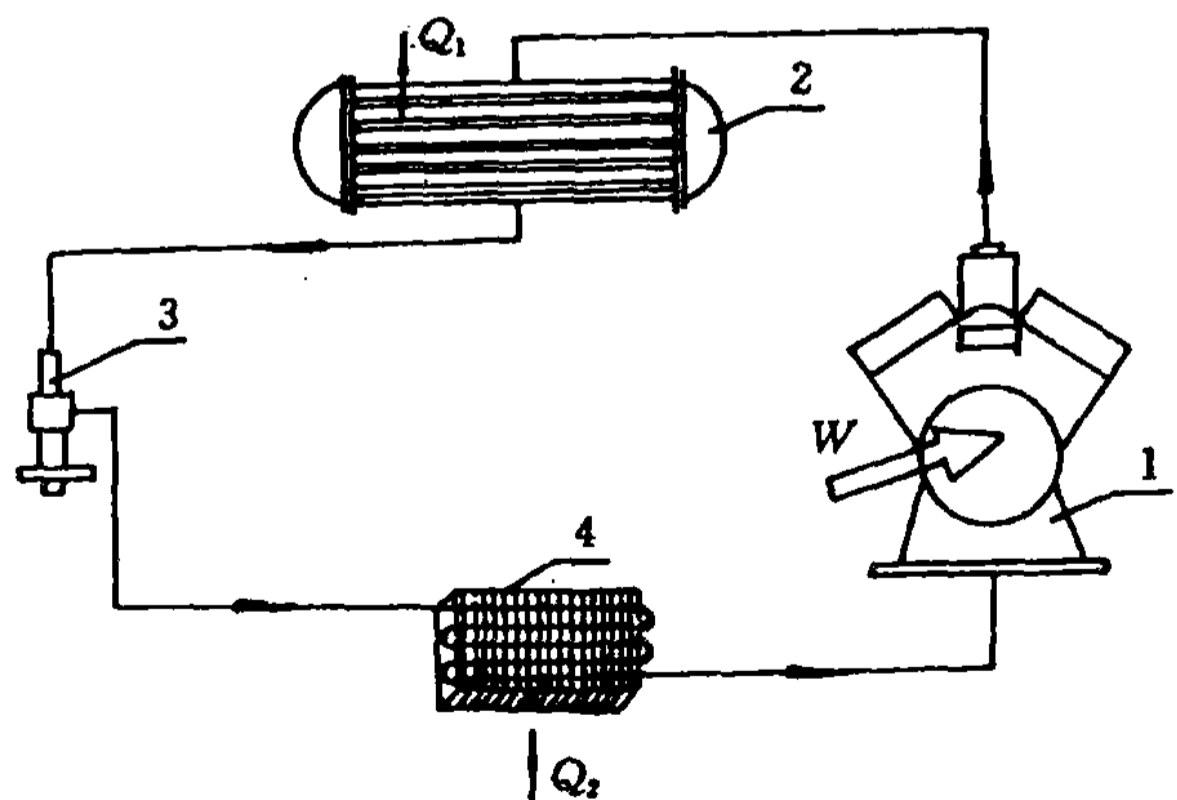


图 1-3 蒸气压缩制冷装置

1-压缩机；2-冷凝器；3-膨胀阀；4-蒸发器

过膨胀阀绝热节流，部分气化吸热，压力、温度降低；最后低压、低温的气液共存工质在蒸发器中吸收外界（冷库）热量而全部汽化；气态工质再返回压缩机循环工作。制冷装置通过工质在蒸发器中的吸热而使冷库温度降低，实现制冷的目的。因此制冷装置中的工质通常称作制冷剂。

制冷装置的目的在于把低温物体的热量向高温物体转移，它与动力装置相反，需要消耗机械功。

三、工程热力学的主要内容和研究方法

工程热力学所研究的主要内容为：

1. 研究热力学的基本定律——热力学第一、第二定律

这是工程热力学的理论基础。其中，热力学第一定律给出了热能与机械能相互转换时的数量关系；热力学第二定律指出了能量转换的方向性，并由此说明热能与机械能之间存在着质的差别，应用这两个定律可以从量和质两个方面综合地研究热力设备中的能量转换。

2. 研究工质的热物理性质

热力设备中的能量转换是借助于工质来完成的，故研究热力设备中的能量转换必须掌握工质的基本热力性质。

3. 研究各种热力设备中的能量转换过程

应用热力学基本定律，分析计算工质在热力设备中所经历的状态变化过程和循环过程，并在此基础上进一步分析影响能量转换效率的因素，探讨提高转换效率的途径。

工程热力学主要采用宏观的研究方法，即通过宏观的物理现象，如压力、温度、体积等的外在表现和吸热、放热、膨胀、压缩等整体行为，总结出有关热现象的基本规律，推导出能量之间的转换关系及其他一些重要结论。研究中虽不涉及物质的内部结构和微观粒子的运动，但必要时也利用微观理论的某些结论，来分析和解释宏观热现象的物理本质。

四、工程热力学与轮机工程专业的关系

工程热力学主要讨论的就是在动力装置中热能变为机械能的过程，而现代商船主要依靠热能动力装置产生推力前进。比如在船舶柴油机中，燃料在气缸内燃烧，将化学能变为燃气的热能，然后再通过曲柄连杆机构把热能转变为机械能，作为带动船舶螺旋桨或发动机的动力输出。同样在汽轮机装置中，通过燃料在船舶锅炉中的燃烧，将燃料化学能变为烟气的热能，然后传递给水和水蒸气，由水蒸气在通过汽轮机时将热能转变为机械能。另外，在海洋船舶上，除动力装置外，还有压缩机、制冷装置、空调装置、造水装置等许多热力设备。因此，对这些热力设备的维护，以及如何保证在船舶安全航行的同时，降低能耗、提高经济性，要求轮机管理人员必须掌握热力设备中能量转换的原理和提高经济性的途径，具备一定的热工基础知识和分析能力。工程热力学是船舶主机、锅炉、汽轮机、船舶辅机等专业课的主要理论基础课。

学习和应用本门学科时，除了要学会有关能量转换方面的基本理论以外，还要注重运用这些理论和定律去解决生产实际中的问题，学会从实际问题抽象为理论并运用理论分析

来解决工程实际问题的能力。在学习每章时，应当注意对实际问题抽象、概括、理想化和简化的思路和方法，这也是本门课的主要教学内容之一。

复 习 题

1. 热能的利用有哪些方式？
2. 工程热力学的研究对象和基本任务是什么？

第二章 基本概念

本章介绍研究热能和机械能相互转换规律的基本概念和术语。它不仅是后续内容的基础，而且对学会热力学的分析方法并用来解决工程实际问题十分重要。

第一节 工质、热力学系统

一、工质

工程热力学中，把实现热能与机械能相互转换的媒介物或工作介质称为工质。工质是实现能量转换必不可少的内部条件。内燃机中，凭借燃气的膨胀把热转化为功，燃气就是工质。蒸汽动力装置中的工质是水蒸气，制冷装置中的工质为制冷剂。

为使能量转换有效而且迅速，通常要求作为工质的物质有良好的流动性和膨胀性，常选气（汽）态物质作为工质。不同性质的物质对能量转换效果有直接影响，因此工质性质的研究是工程热力学的重要内容之一。

二、热力学系统

热力学中，为便于分析，选取某一范围内的物质或某特定的空间作为研究对象，以研究其热力学规律，这种被人为划分出来的研究对象称为热力学系统，简称热力系或系统，如图 2-1 所示。系统之外的物体统称为外界或环境，系统与外界的分界面称为边界。

热力学系统可以是一定质量的工质，也可以是一定容积的空间。包围系统的边界可以是真实的、虚构的，也可以是固定的、移动的。图 2-1 (a) 中所示气缸活塞机构，若取气缸内的气体为系统，则气缸内壁和活塞内壁构成真实、移动的边界。图 2-1 (b) 所示汽轮机，若取 1-1、2-2 截面及气缸所包围的空间作为系统，则 1-1、2-2 截面所形成的边界便是虚构的、固定的。

一般说来，系统与外界总是处于相互作用之中，彼此之间可以通过边界进行能量和物质的交换。能量的交换有热和功两种形式，而物质的交换总伴随着能量的交换。按照系统与外界相互作用的特点，系统

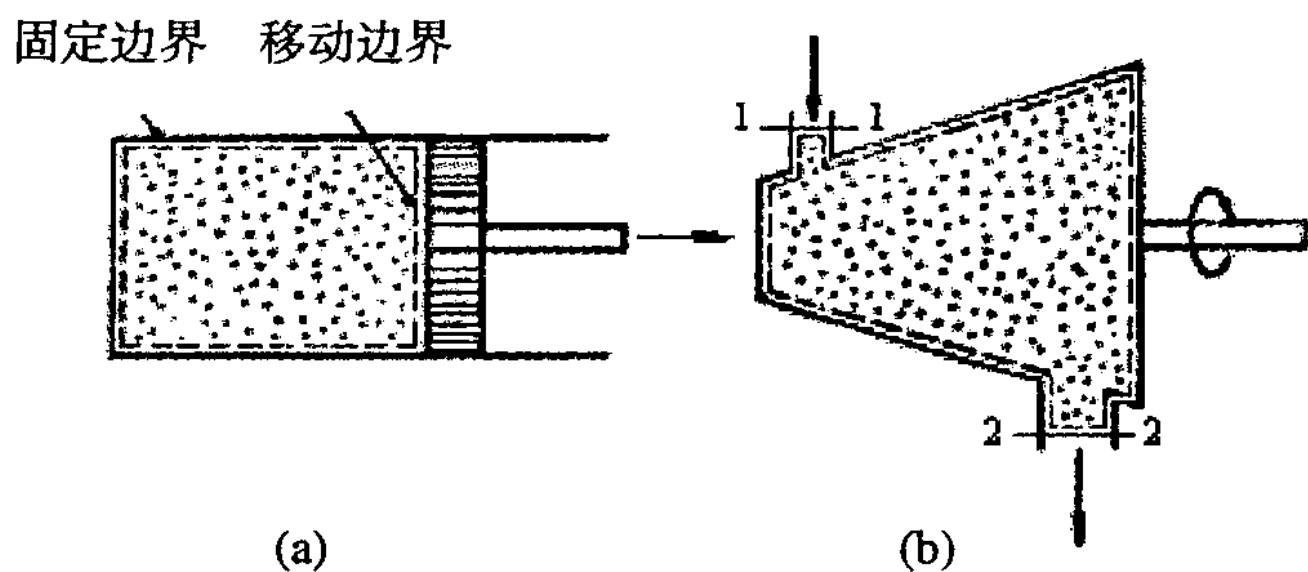


图 2-1 热力学系统

可以有以下几种形式：

1. 闭口系统

系统与外界无物质交换，或者说没有物质穿过边界，系统内的物质总量保持恒定不变。图 2-1 (a) 所示就是闭口系统。又如活塞式压缩机压缩过程中的工质，柴油机气缸中正在进行膨胀的燃气，都是轮机工程中闭口系统的实例。

2. 开口系统

系统与外界有物质交换，或者说有物质穿过边界，系统内的物质总量可以保持恒定或发生变化。图 2-1 (b) 所示汽轮机汽缸为开口系统，运行中工质不断地流进流出。

3. 绝热系统

系统与外界无热量交换，但可以有功量和质量等交换。如工质流经汽轮机时，其散热量与传输给外界的热量相比可以忽略，故汽轮机汽缸可看作绝热系统。又如内燃机气缸中封闭的工质，在膨胀时有热量传给冷却水，若取冷却水和工质为系统，则该系统与外界没有热量交换，为绝热系统。

4. 孤立系统

系统与外界既无能量（包括功量和热量）交换又无质量交换。如果把所有发生相互作用的各种设备作为一个整体，并选择这个整体为所研究的系统，则这个系统与外界没有任何相互作用，为孤立系统。可见，孤立系统内部各部分之间可以存在物质交换和能量交换。自然界中的物质都是相互联系、相互制约和相互作用的，严格地说，绝对的绝热系统和孤立系统并不存在。但若系统与外界的热量、功量和质量交换甚小，其影响可忽略不计，就可以将这样的系统看作是绝热系统或孤立系统。绝热的刚性闭口容器，比如长期放置的氧气瓶，可以看作孤立系统的实例。

另外，还有一些特殊的系统，如具有无限大热容量的系统，它们在放出或吸收有限热量时并不改变系统自身的温度，称为热源，如高温热源、低温热源等。

第二节 系统的热力状态和状态参数

一、热力状态

为了对系统中能量转换的情况进行分析，首先要对系统的热力状态进行描述。系统在某一瞬时的宏观物理状况称为系统的热力状态，简称状态。为简化对状态的描述，工程热力学一般只对平衡态进行分析研究。

二、热力学平衡态

平衡态，指在不受外界影响的条件下，系统的宏观性质不随时间改变的状态。

比如冷、热程度不同的两个物体相互接触，构成一个系统。热物体会自动变冷，冷物体将变热，直到两物体冷热程度达到均匀一致为止。这时如果没有外界影响，系统的状态将长久保持下去，系统处于热平衡。又如，一封闭容器系统内，中间用隔板分成两部分，其中一部分充满温度为 T_1 、压力为 p_1 的空气，另一部分充满温度为 T_2 、压力为 p_2 的空气。

抽去隔板，两部分的空气立即相互混合，直到各处的温度、压力均匀一致为止。此后，若无外界影响，容器中的空气将长久保持在这一状态。这时系统处于平衡态，且同时处于热平衡和力平衡。

对不发生化学反应的系统，同时具备系统各部分之间没有热量传递的热平衡和没有相对位移的力平衡，我们就称系统处于热力学平衡态。处于热力学平衡态的系统，其内部温度和压力处处相等，并且对应于系统的每一个平衡态，有且只有一个压力和一个温度。

应该指出，所谓不受外界影响，是指外界对系统不做功，也不传热。没有外界影响和不随时间变化是平衡态必不可少的两个基本条件。不能把平衡态简单地说是随时间变化的状态，也不能说成是外界条件不变的状态。

平衡态是热力学的一个重要基本概念，工程热力学只讨论处于平衡态的系统。本书中除特殊说明外，所提到的系统的状态均指平衡态。

三、状态参数

描述系统宏观状态的物理量称为系统的热力状态参数，简称状态参数。对处于平衡态的任一系统，只需要很少几个确定的状态参数，就可以确切地描述系统的宏观状态。热力学中常见的状态参数有温度、压力、比容、内能、焓和熵等。

状态参数的数值由系统的状态惟一确定，是状态的单值函数。系统状态发生变化时，状态参数也将全部或部分地发生变化，且状态参数的变化量只与初、终状态有关，与状态变化经历的途径无关。热力学中还有一类参数，其变化量不仅与系统的初终状态有关，还与变化的过程和途径有关，因而称为路径参数，或过程参数。功和热量是这类参数的例子。

热力状态参数按其系统与质量的关系，可分为强度量和尺度量。与质量无关的称为强度量，如压力 p 、温度 T 等，强度量不具有可加性；与质量成比例的量称之为尺度量，如容积 V 、内能 U 、焓 H 、熵 S 等，尺度量是可加量，即随着质量的增加而增加。系统的总尺度量是系统各部分尺度量之和。尺度量除以质量可以转化为强度量。转化后的强度量，在其对应的尺度量名称前冠以“比”字，并用相应的小写字母表示，如比容 v 、比内能 u 、比焓 h 和比熵 s 等。

四、基本状态参数

温度、压力、比容可以直接用仪表测定，称为基本状态参数。

1. 压力

单位面积上所受的垂直作用力称为压力（即压强），以符号 p 表示。根据分子运动理论，气体的压力是大量气体分子撞击容器壁面所产生的平均效果。若气体作用在面积为 A 的容器壁面上的垂直作用力为 F ，那么该壁面上的压力为

$$p = F / A \quad (2-1)$$

国际单位制中，压力的单位用 Pa (N / m^2) 表示，称为帕斯卡。工程上 Pa 的单位太小，常采用 MPa（兆帕）、kPa（千帕）和 bar（巴）来表示。

$$1 \text{ MPa} = 1 \times 10^6 \text{ Pa} \quad 1 \text{ kPa} = 1 \times 10^3 \text{ Pa} \quad 1 \text{ bar} = 1 \times 10^5 \text{ Pa}$$

工程上常用大气压、液柱高度等表示压力的大小，比如标准大气压（atm，又称物理大气压）、工程大气压（at）、千克力（kgf/cm²）、毫米水柱（mmH₂O）、毫米汞柱（mmHg）等。它们之间的关系是：

$$1 \text{ mmHg} = 133.3 \text{ Pa}, \quad 1 \text{ mmH}_2\text{O} = 9.8 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ at} = 1 \text{ kgf/cm}^2 = 10^4 \text{ kgf/m}^2 = 9.8 \times 10^4 \text{ Pa},$$

$$1 \text{ atm} = 1.013 25 \times 10^5 \text{ Pa} = 1.033 23 \text{ at} = 760 \text{ mmHg} = 10.33 \text{ mH}_2\text{O}$$

系统的压力常用各种测压计来测定，并以大气压力 p_b 作为测量的基准。一般情况下，容器内系统的实际压力称为绝对压力，以 p 表示。测压计测出的不是绝对压力，而是气体的绝对压力与当地大气压力的差值，是一个相对压力，如图 2-2 所示。当容器内气体的实际压力大于大气压力时，测压计上的读数为正，测压计称为压力表，其读数称为表压力，以 p_g 表示，则

$$p = p_b + p_g \quad (2-2)$$

当气体的实际压力低于大气压力时，测压计上的读数为负，测压计称为真空表，其读数的绝对值称为真空度，以 p_v 表示，则

$$p = p_b - p_v \quad (2-3)$$

显然真空度越高，绝对压力越低。

绝对压力、大气压力和表压力、真空度之间的关系如图 2-2 所示。因为大气压力的数值会随时间和地点而变，所以测压计测得的数值会因大气压力的改变而改变。因此只有绝对压力反映系统的真实压力，才能作为系统的状态参数。如果没有特殊说明，本书中的压力均指绝对压力。

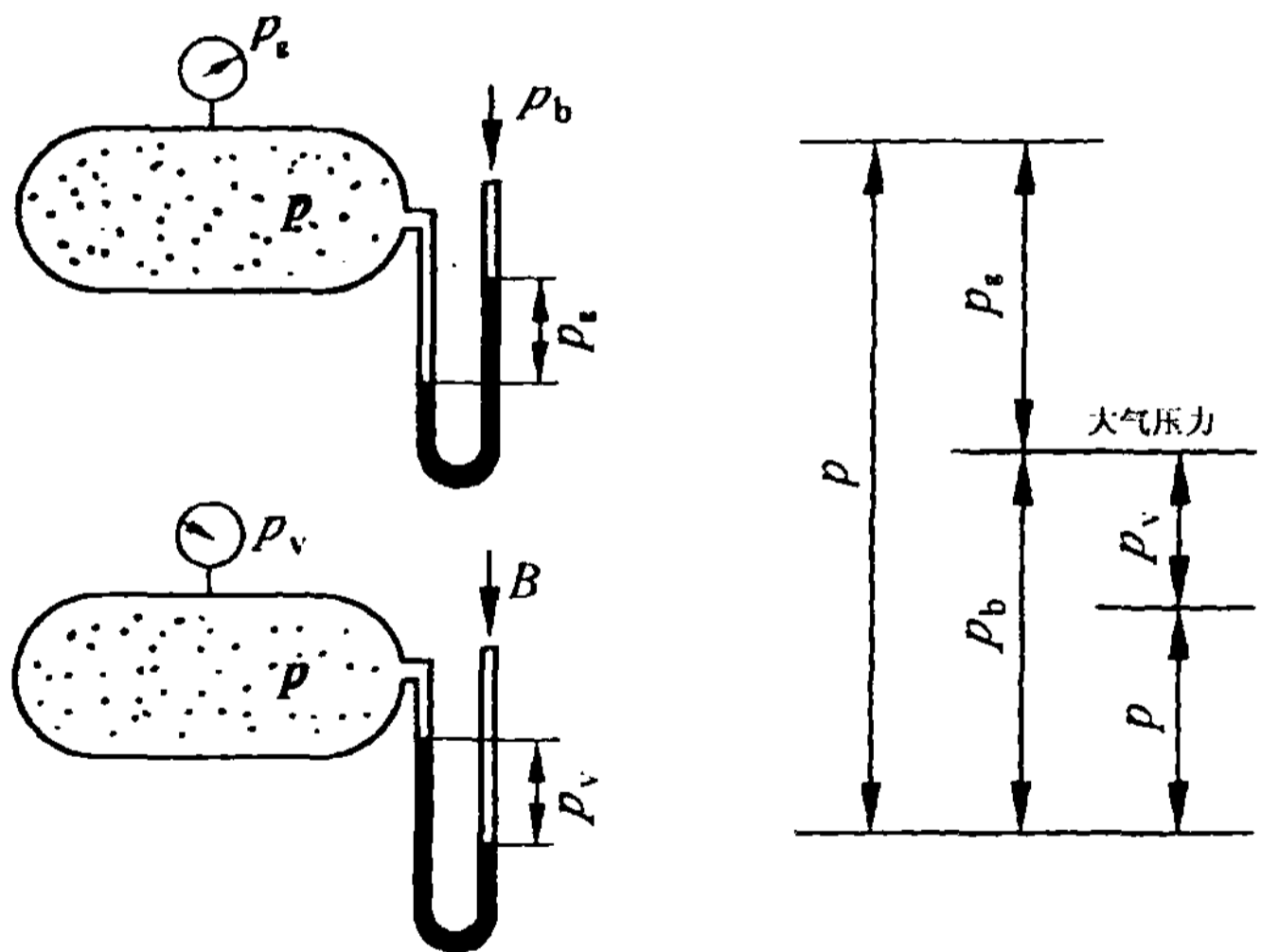


图 2-2 各种压力关系图

工程计算中，为简便起见，常把大气压力 p_b 近似地

当作 0.1 MPa 来处理，这在较高压力的计算中误差很小。但在计算低压力，特别是在计算真空度时，就会引起较大的误差，这一点应当注意。

例题 2-1 某油舱辅助锅炉产生蒸汽的表压力为 13 bar，凝汽器中的真空度为 710 mmHg，当时大气压力为 735 mmHg，试计算两设备的绝对压力（用国际单位表示）。

解：由题知，大气压力

$$p_b = 735 \text{ mmHg} = 735 / 760 \times 1.013 25 \times 10^5 \text{ Pa} = 0.98 \times 10^5 \text{ Pa}$$

锅炉的表压力