

中等专业学校教材

热工学理论基础

武汉电力学校 程上琬

水利电力出版社

传热学主要符号表

λ	导热系数, 波长	r	半径, 汽化潜热
δ	厚度	ϵ	黑度, 换热器的传热有效度
Q	传热量	C	辐射系数
q	单位面积热流量	μ	动力粘度
q_l	单位管长热流量	ν	运动粘度
α	导温系数	u	流速
τ	时间, 粘性力, 辐射透率	E	物体的辐射力
A	面积	φ	辐射角系数
ρ	密度, 辐射反射率	L	有效辐射层厚度
α	放热系数, 辐射吸收率	W	流体的热容量
β	体积膨胀系数	ψ	换热器的温差修正系数
H	高度	NTU	传热单元数
l	长度	K	传热系数
d	直径		

内 容 提 要

本书是中等专业学校热能动力设备专业的教材，也可供热力工程和有关专业的技术人员参考。

全书共分两篇，第一篇工程热力学，叙述工程热力学的基本概念、基本定理、热力过程、热力循环，着重介绍水蒸汽性质、气体和蒸汽的流动及蒸汽动力循环，对湿空气也作了简要介绍。第二篇传热学，介绍导热、对流和热辐射三种基本传热方式，以及传热过程的规律和计算，对换热器的工作原理和传热计算也作了适当介绍。

全书采用中华人民共和国法定计量单位。

前 言

本书是根据水利电力部1983~1987年中等专业学校教材编审出版规划而编写的。本书以水利电力部制定的《热工学理论基础》教学大纲为主要编写依据,在编写过程中还采纳了热动专业教研会热工学理论基础课程组会议所提出的一些建议。水利电力部教育司曾组织有关学校对初稿进行了评审,编者根据评审学校的意见,又对初稿进行了认真的修改。

全书由西安电力学校谷应鸣同志主审,提出了很多宝贵的意见和建议,在此表示衷心的感谢。

在编写过程中,曾参考了武汉电力学校彭成刚同志所写的“对流换热”初稿的部分内容。全书插图由武汉电力学校马水枝同志描绘。

诚恳地希望广大师生及读者对本书的缺点提出批评指正。

编者

1987年6月

工程热力学主要符号表

p	压力	R	通用气体常数
T	热力学温度	μ	千摩尔质量
t	摄氏温度	V	千摩尔容积
p_a	大气压力	c	质量比热, 流速
p_r	表压力*	c'	容积比热
p_v	真空	μc	千摩尔比热
ρ	密度	k	绝热指数*
m	质量	n	多变指数
V	总容积	η_i	热效率
v	比容	S	熵
G	重量*	s	比熵
A	面积	E	工质焓
W	功	e	比焓
w	比功	E	热流熵
Q	热量	e	比熵
q	比热量	x	干度
U	内能	r	汽化潜热
u	比内能	d	汽耗率, 湿空气的比湿度
w_i	技术功	a	音速
w	轴功	M	马赫数
H	焓	β	压力比
h	比焓	α	抽汽率
R	气体常数	ϕ	湿空气的相对湿度

* 考虑到热力学教学中的习惯及当前的过渡实际状况, 本书仍沿用了部分习惯的名词术语和概念, 表压力即计示压力; 绝热指数即定熵指数; 凡涉及到重量概念时应理解为重力的概念, 特予说明。

目 录

前言

工程热力学主要符号表

传热学主要符号表

绪论	1
----	---

第一篇 工程热力学

第一章 基本概念	4
第一节 工质和热力系	4
第二节 工质的状态及基本状态参数	6
第三节 平衡状态 准平衡过程和可逆过程	10
第四节 气体的功	13
第五节 热量	15
第二章 热力学第一定律	18
第一节 热力学第一定律的实质	18
第二节 内能	19
第三节 热力学第一定律的数学表达式	20
第四节 稳定流动的能量方程式	22
第五节 状态参数焓	25
第六节 稳定流动能量方程式应用举例	27
第三章 理想气体的性质	31
第一节 理想气体状态方程式	31
第二节 理想混合气体	35
第三节 理想气体的比热	40
第四节 理想气体内能变化和焓变化的计算	47
第四章 理想气体的热力过程	53
第一节 分析热力过程的目的及一般方法	53
第二节 定容过程	53
第三节 定压过程	55
第四节 等温过程	57
第五节 绝热过程	58
第六节 多变过程	61
第五章 热力学第二定律	69
第一节 热力循环	69
第二节 热力学第二定律	72

第三节	卡诺循环 卡诺定理	74
第四节	熵	79
第五节	不可逆过程中熵的变化	84
第六节	孤立系统熵增原理	90
第七节	状态参数熵	93
第六章	水蒸汽	99
第一节	基本概念	99
第二节	定压下水蒸汽的形成过程	100
第三节	水蒸汽状态参数的确定 水和水蒸汽的热力性质表	104
第四节	水蒸汽的焓-熵图	107
第五节	水蒸汽的热力过程	109
第七章	气体与蒸汽的流动	115
第一节	稳定流动的基本方程式	115
第二节	喷管内流动的基本特性	117
第三节	喷管中气体流速及流量的计算	120
第四节	喷管的设计与校核	126
第五节	有摩擦的绝热流动	128
第六节	扩压管的概念	128
第七节	绝热节流	129
第八章	蒸汽动力循环	133
第一节	分析循环的目的与一般方法	133
第二节	朗肯循环	134
第三节	蒸汽参数对循环热效率的影响	137
第四节	蒸汽再热循环	139
第五节	回热循环	141
第六节	热电循环	145
第九章	湿空气	150
第一节	湿空气概述	150
第二节	湿空气的湿度	151
第三节	湿空气的焓	154
第四节	湿空气的焓-湿图(h - d 图)	155
第五节	湿空气的应用举例	157

第二篇 传 热 学

第十章	导热	159
第一节	基本概念	159
第二节	导热的基本定律	161
第三节	平壁的稳态导热	163
第四节	圆筒壁的稳态导热	167
第五节	不稳定导热的概念	170

第十一章 对流换热原理	175
第一节 对流换热的基本概念	175
第二节 影响对流换热的因素	179
第三节 对流换热的计算公式及确定放热系数 α 的方法	181
第四节 相似理论简介	182
第十二章 各种对流换热过程的特征及计算公式	189
第一节 自由运动换热	189
第二节 流体在管内受迫运动换热	192
第三节 流体横掠圆管时的对流换热	195
第四节 沸腾换热	198
第五节 蒸汽凝结时的对流换热	203
第十三章 热辐射	208
第一节 热辐射的基本概念	208
第二节 热辐射的基本定律	211
第三节 物体间的辐射换热	215
第四节 气体辐射	223
第十四章 传热	227
第一节 基本概念	227
第二节 通过平壁、圆筒壁、肋壁的传热	229
第三节 传热的增强与削弱	235
第十五章 换热器	241
第一节 换热器及其分类	241
第二节 表面式换热器的传热计算公式和平均温差	242
第三节 表面式换热器传热计算的基本方法及实例	248
参考书目	254
习题答案	255
附录	359
表一 压力单位换算	259
表二 常用能量单位的互换常数	259
表三 一些气体的千摩尔质量和气体常数	259
表四 气体的平均定压质量比热	260
表五 气体的平均定压容积比热	261
表六 气体的平均定容质量比热	262
表七 气体的平均定容容积比热	263
表八 饱和水与饱和蒸汽性质表(按温度排列)	264
表九 饱和水与饱和蒸汽性质表(按压力排列)	265
表十 未饱和水与过热蒸汽性质表	267
表十一 几种材料的密度、导热系数、比热容和热扩散率	279
表十二 干空气的热物理性质	280

表十三	在大气压力 ($p=101325\text{Pa}$) 下烟气的热物理性质	280
表十四	饱和水的热物理性质	281
表十五	干饱和水蒸汽的热物理性质	282
表十六	几种材料在表面法线方向上的辐射黑度	283
图一	湿空气的焓-湿图 (SI制)	284
图二	水蒸汽的焓-熵图 (抽页)	

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。目前已为人们发现的自然界中可被利用的能源主要有：风能、水能、太阳能、地热能、燃料的化学能和原子核能等。在这些能源中，除风能和水能是以机械能的形式（指空气的动能和水的位能）提供给人们外，其余各种能源往往直接以热能的形式，或通过相应的设备进行能量转换将它们转变为热能提供人们。因此，热能的研究和利用对整个人类的生产和生活有着巨大的意义。

热能的利用有两种基本方式，一为直接利用，即将热能直接用来加热物体，如烘干、蒸煮、采暖、熔化等。另一为间接利用，即将热能转换为机械能或电能加以利用，如火力发电厂、车辆船舶飞机的动力装置等。特别是电能，由于具有传输和使用方便、易于控制等许多优点，所以它已成为现代人类生产及生活中不可缺少的动力来源。因而，一般常将热能最终转变为电能再加以使用。

二、火力发电厂的生产过程

火力发电厂的生产过程，就是将燃料中的化学能转变为热能（在锅炉中），再将热能转换为机械能（在汽轮机中），机械能再进一步转变为电能（在发电机中）的一系列能量转换过程。

图0-1所示是以煤为燃料的火力发电厂的生产过程示意图。

煤送到锅炉房后，经过磨煤机被磨制成煤粉，在热空气的输送下进入锅炉燃烧室内燃烧，生成高温烟气，使燃料的化学能转变为烟气的热能；锅炉受热面将此热能传给水，水受热而蒸发，变成具有一定压力和温度的蒸汽，由此，烟气的热能通过传热就变成水蒸汽所具有的热能；蒸汽携带着热能进入汽轮机，在汽轮机的喷管中，蒸汽的压力降低、速度提高，利用蒸汽所获得的很大的动能冲动汽轮机转子上的叶片，使汽轮机转子旋转，从而将蒸汽的热能转变为机械能；汽轮机再带动发电机一起旋转而发出电能。

作功后的蒸汽在凝汽器中放热而凝结成水，再由水泵经低压加热器、除氧器、高压加热器送回锅炉。如此周而复始，就使燃料燃烧时放出的热能连续不断地转变为电能。

从发电厂的生产过程可见，就其能量转换来说，可以分为两大部分，即从燃料的化学能转变为机械能的部分和从机械能转变为电能的部分。前者称为发电厂的热力部分，后者称为发电厂的电气部分。热力部分包括锅炉、汽轮机、凝汽器、水泵、加热器等设备，以及连接它们构成的热力系统，这些设备就是通常所说的热力设备。

三、热工学理论基础的主要内容及研究方法

热能与机械能的转换及热量的传递是发电厂热力设备中的主要工作过程。能量的转换

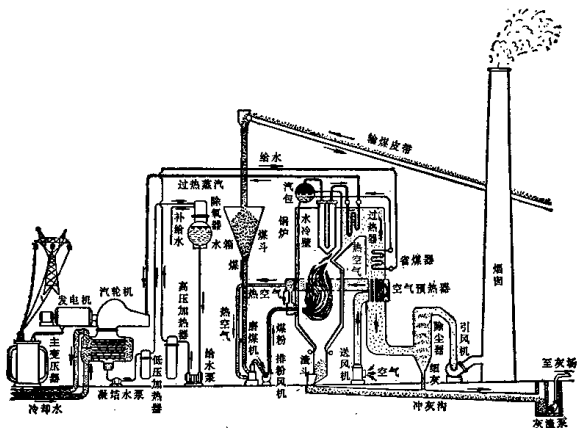


图 0-1 火力发电厂生产过程示意图

必须遵循哪些规律？热量的传递又要受哪些因素的影响？如何使电厂中的能量转换和热量传递在最有利的条件下进行？怎样提高电厂的热经济性等，都是本课程讨论的主要内容。

热工学理论基础包括工程热力学和传热学两部分内容。工程热力学主要研究热能与机械能转换的客观规律，即热力学的基本定律，分析工程上借以实现热能和机械能相互转换过程的媒介物质（如水和蒸汽）的基本热力性质，以及应用热力学基本定律分析计算工作物质在热力设备中所经历的变化过程，并在此基础上，进一步分析影响能量转换效果的因素，探讨提高转换效果的途径。传热学是研究热能传递的科学。由于热能可以自发地从高温物体向低温物体传递，所以，只要存在温差，就必然有热量的传递过程。传热学的主要内容就是对传热的基本方式和实际的传热过程进行分析，研究物体内部或物体与物体之间的热量传递机理，从而找出提高传热效果或减少热损失的途径。

热工学理论基础研究的是热、功互换和热量传递等宏观现象，所以，主要应用宏观的研究方法，即从宏观现象出发，对热现象进行直接的观察和实验，总结出自然界的一些普遍的、基本的规律，这些规律就是热力学的基本定律。然后再以这些定律为基础，通过严密的逻辑推理和演绎，得到具有高度普遍性的结论。为了帮助认识某些热现象，必要时也引用分子运动论的观点，即微观的分析方法来作适当的解释，以帮助理解宏观现象的物理本质。

热工学理论基础这门课，是动力类专业的一门主要专业基础课。各种热力设备的设计、计算及改进，都要用到工程热力学和传热学的理论及计算方法，因此，动力类专业的学生

一定要学好这门课，为今后专业课的学习打下必要的理论基础。

四、本书所用的单位制

1984年2月27日国务院发布《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》，规定我国的计量单位一律采用“中华人民共和国法定计量单位”。我国的法定计量单位基本上采用国际单位制，同时选用了一些非国际单位制单位。国际单位制是1960年第十一届国际计量大会正式通过的，其国际代号为“SI”。其基本单位共七个，其中涉及热学方面的有五个，即长度的米(m)；质量的千克(kg)；时间的秒(s)；热力学温度的开[尔文](K)；物质的量摩尔(mol)。另有两个辅助单位。利用这些基本单位和辅助单位可以导出一系列具有专门名称的导出单位，这样就可以构成不同科学技术领域中所需要的全部单位。

国务院要求到1987年止，国民经济各主要部门一般只准使用法定计量单位，1990年全国各领域全面采用法定计量单位。为此，本书一律采用法定计量单位。书后附录中列有压力和能量的各种单位制之间的换算关系，以备查用。

第一篇 工程热力学

第一章 基本概念

第一节 工质和热力系

能够将热能转变为机械能的设备，统称为热机。例如内燃机、蒸汽机和汽轮机等都是热机。

在热机里要使热能不断地转变为机械能，一定要借助于一种工作物质，例如，汽轮机和蒸汽机的工作需要蒸汽；内燃机的工作需要燃气等。工作物质经过吸热、膨胀而完成做功。这种实现热能和机械能相互转化的工作物质就叫做工质。

由于工质连续不断地流过热力设备而膨胀做功，因此，要求工质应有良好的膨胀性与流动性。此外，还要求工质价廉、易得、热力性能稳定、不腐蚀设备、无毒等。在物质的三态中，气态物质受热膨胀的能力最大，流动性也最好，显然，气态物质最适宜作工质。而水蒸汽具有价廉易得、无毒、不腐蚀设备等优点，所以目前火力发电厂主要以水蒸汽为工质。

在工程热力学中，常把能不断地供给热能的物体称为高温热源，简称热源。在热力工程中，主要是利用矿物燃料在燃烧设备中燃烧而产生热能。由于燃料是源源不断地供给燃烧设备的，所以可以认为热源热容量无限大，不因向工质传热而降低温度。因此，每一热源对应有一恒定的温度。热源供给的热能由工质携带进入热机，将热能的一部分转变为机械能；余下的热能仍由工质携带，离开热机而排入大气或冷却水。这种接受工质排出剩余热能的物体叫低温热源，或简称冷源。同理，由于大气容量无限大，也可认为冷源温度恒定不变。

热能动力装置的工作过程，概括起来就是工质从高温热源吸取热能，将其中一部分转化为机械能，并把余下的一部分传给低温热源的过程。此关系可以用图1-1表示。

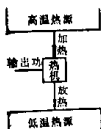


图 1-1

为分析问题方便起见，和力学中取分离体一样，热力学中常把分析的对象从周围的物体中分隔出来，研究它通过分界面和周围物体之间的能量交换。这种被人分隔出来的分析对象，称为热力系统，简称热力系。系统外的一切物体统称为外界。热力系和外界之间的分界面可以是实际存在的，也可以是假想的；可以是固定的，也可以是尺寸和形状变化的，或者是运动着的。

在图1-2所示的装置中，如果取封闭在气缸中的气体作为研究对象，则气缸内壁和活塞的下表面即构成该系统的边界（如图中虚线所示）。显然这个边界是真实存在的。在图1-3所示的装置中，气体在管内流动，如果取截面1-1与截面2-2之间的气体作为研究对象，则管道内壁和截面1-1及2-2构成系统的边界（如图中虚线所示）。这里，系统的边界是固定的，其中一部分（管道内壁）是真实存在的，而另一部分（截面1-1与2-2）则是假想的，因为管内流动的各部分工质之间并没有实际的分界面。

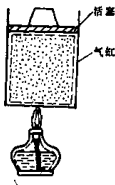


图 1-2

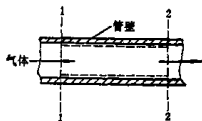


图 1-3

分析研究任何一个热力学问题时，首先必须明确所考虑的系统范围。系统范围应根据所研究问题的实际情况，并以解决问题方便为原则来选取。

热力系与外界之间可能有以热和功的形式进行的能量传递，也可能同时有物质的交换。按照系统与外界进行物质交换的情况，系统可分为两类：

封闭热力系（简称闭系）——系统与外界可以传递能量，但没有物质的交换。例如如图1-2所示的系统，气缸内的气体可以吸热，可以推动活塞作功，但却没有物质流入或流出气缸。这类系统的特点是没有物质穿过边界，其内部的质量恒定不变，所以也可称为定质量热力系，或不流动热力系。

开口热力系（简称开系）——系统与外界既可以有能量的传递，又可以有物质的交换。例如如图1-3所示的系统，不断有气体从截面1-1流入，也不断有气体从截面2-2流出。由于有物质穿过边界，因而这类系统内部的质量，可以保持恒定或发生变化，所以也可称之为变质量热力系或流动热力系。

按照系统与外界进行能量交换的情况，又可以定义出：

绝热热力系——系统与外界没有热量交换的热力系。

孤立热力系——系统与外界不发生任何相互作用，既无物质交换又无能量交换的热力系。

需要指出的是，绝对的绝热系统和孤立系统是不存在的。但是，如果某些实际的热力系统，在某段时间内与外界的热量很少，对于系统的能量平衡和能量转换所起的作用可忽略不计，则这样的系统就可以近似地看作绝热系统。同样，如果某些系统与外界的物质交换和能量交换都很微弱，对系统所产生的影响可以忽略不计，则这样的系统就可近似地看作孤立系统。可见，绝热热力系和孤立热力系都是从实际事物中概括出来的抽象概念。在抽象的过程中，略去了不起重要作用的次要因素，抓住了事物的本质，因而这些概念能

代表某些实际事物的主要方面。绝热热力系和孤立热力系是热力学中的两个重要概念，它们的建立和应用可以使某些实际热力系的研究得到简化。并且，将热力学基本定律应用于孤立系统所得出的一些推论，在热力学中具有重要的意义。

第二节 工质的状态及基本状态参数

热动力装置中，热能向机械能的转换是借助于工质吸热和对外膨胀作功来完成的。显然，在此过程中，工质的压力、温度等一些物理特性随时都在改变，或者说工质的状态随时都在改变。所以，状态是指在某一瞬间工质所呈现的宏观物理状况。用来描述和说明工质状态的一些物理量（如压力、温度等）则称为工质的状态参数。状态参数值只取决于工质的状态，也就是说，对应一定的状态，工质的各状态参数有确定的数值。因面，任何物理量，只要它的变化量等于始、终两态下该物理量的差值，而与工质的状态变化途径无关，都可以作为状态参数。

在热力学中，为了研究的需要而采用的状态参数有：温度、压力、比容、内能、焓、熵、烟等。其中只有压力、温度两个参数可以用仪表直接测量，比容由测出的物体质量和容积经计算而得，而且这三个参数的物理意义都比较易于理解，所以常称为基本状态参数，下面首先对它们分别加以介绍。至于其它一些参数，都只能从基本状态参数间接算得，它们的性质将在后而的章节中陆续介绍。

一、温度

温度是标志物体冷热程度的一个物理量。热物体温度高，冷物体温度低。当两个物体接触时，温度高的物体就要向温度低的物体传热。如果两者间没有热量传递，则两物体的冷热程度一样，即处于热平衡状态，两物体温度相等。

处于热平衡的物体具有相同的温度，这是用温度计测量物体温度的依据。当温度计与被测物体达到热平衡时，温度计的温度即等于被测物体的温度。

温度的数值表示方法称为温标。任何一种温标的建立，根本问题是确定温标的基准点和分度方法。例如，旧的摄氏温标规定在760mm汞柱气压下纯水的冰点温度为0度，沸点的温度为100度，两定点间分为100个分度，每一分度叫做摄氏一度。

国际单位制采用热力学温标为基本温标。用这种温标确定的温度称为热力学温度，符号为“T”，单位为“开尔文”，中文代号“开”，国际代号“K”。热力学温标选取水的三相点（即水的固、液、气三相平衡共存的状态）为基本定点，并定义它的温度为 273.16K 。也就是定义热力学温度的单位开尔文一度等于水三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。

与热力学温标并用的还有热力学摄氏温标，简称摄氏温标。它所确定的温度称为摄氏温度，用“t”表示，单位为“摄氏度”，代号“℃”。这种摄氏温标与旧的摄氏温标不同，它是由热力学温标导出的。摄氏温度按以下定义式确定：

$$t = T - 273.15 \quad (1-1)$$

这就是说，规定热力学温度 273.15K 为摄氏温度的零度（ $t = 0^\circ\text{C}$ ）。按此新的定义，摄氏

温标的零点 (0°C) 只是接近于纯水的冰点温度, 而并不严格相等, 两者差别不超过万分之一度; 沸点的温度也不等于 100°C , 差别不超过百分之一度。工程上, 常将 760mmHg 下水的冰点和沸点温度近似地取作 0°C 与 100°C , 并将摄氏温度和热力学温度的关系近似地取为:

$$t = T - 273 \quad (1-2)$$

摄氏温度与热力学温度之间每一温度间隔的大小完全一样, 1°C (开尔文) 全等于 1°C (摄氏), 即 $1^{\circ}\text{C} = 1\text{K}$, 只是所取零点不同。图 1-4 标明了两种温标间的关系。

由于两种温度间隔划分一样, 因而凡涉及到温差的地方, 用 K 或 $^{\circ}\text{C}$ 在数值上均相同。即, $\Delta t = \Delta T$ 。

从微观角度分析, 物体的冷热程度取决于物体内部微粒运动的状况。按分子运动理论, 气体的热力学温度与气体分子的平均移动动能成正比, 它们之间的关系是:

$$\frac{mc^2}{2} = BT$$

式中: T 为热力学温度; m 为分子质量; c 为分子平移运动的均方根速度; B 为比例常数。可见, 气体分子平均平动能愈大, 物体的温度就愈高。所以, 温度标志着物体内部分子无规则热运动的强烈程度。

二、压力

单位面积上所受到的垂直作用力称为压力。以符号 P 表示。气体分子运动论指出, 气体的压力是气体分子作不规则运动时撞击容器器壁的结果。由于气体内部所包含的分子数目极多, 它们对容器壁撞击的次数极为频繁, 因而人们不可能分辨出单个分子的撞击, 只能观察到大量分子撞击的平均结果。气体压力就是大量气体分子撞击容器壁时, 在单位面积上所产生的垂直方向的平均作用力。

工程上容器内工质的压力是由压力表来测定的。一般用弹簧管式压力表 (图 1-5) 测定, 较小压力用 U 形管压力计测定 (图 1-6 所示)。这些表计的测量原理都是建立在力平衡基础上的。弹簧管式管外作用着当时当地大气压力, 管内作用着容器内气体的真实压力。当容器内气体的真实压力等于周围大气压力时, 压力表上的指针不动而指在零位。只有当气体的真实压力超过了大气压力时, 表上的指针才开始移动。所以表上所指示的压力数值是真实压力超过大气压力的部分。同理, U 形管式压力计是左右连通管保持力平衡, 液面的差值所反映的压力也是工质的真实压力和大气压力之间的差数。

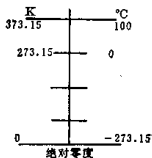


图 1-4

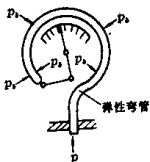


图 1-5

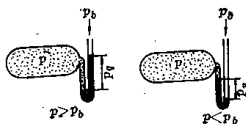


图 1-6

工质的真实压力称为绝对压力, 以 p 表示。大气压力以 p_0 表示。绝对压力大于大气压力时, 超出大气压力之值, 即表计所测出的压力称为表压力, 以 p_s 表示。据根力平衡原则, 显然

$$p = p_0 + p_s \quad (1-3)$$

当容器内的绝对压力低于大气压力时 ($p < p_0$), 测压仪表指示的读数习惯上称为负压或真空度, 用 p_v 表示。则有:

$$p = p_0 - p_v \quad (1-4)$$

绝对压力、表压力、大气压力和真空度之间的关系, 可用图1-7来表示。

大气压力的值可用气压计测定, 其值随测量的时间、地点而异。因此, 表计所测得的压力也随之改变。所以只有绝对压力才能作为状态参数, 而表压力和真空度都不是状态参数。如无特殊说明, 本书中的压力均指绝对压力。

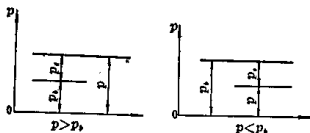


图 1-7

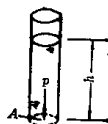


图 1-8

压力的单位由力和面积所取的单位而定。在国际单位制中, 力的单位是 N (牛顿), 面积的单位是 m^2 (平方米), 压力的单位则是 N/m^2 (牛顿/米²), 称为帕斯卡, 中文代号“帕”, 国际代号“Pa”, 即

$$1Pa = 1N/m^2$$

工程实用中, 以 Pa 为压力单位常嫌太小, 计算不方便, 故常取 MPa (兆帕) 作为实用单位。即

$$1MPa = 10^6 Pa$$

压力的大小也可以用液柱高度表示。如图1-8所示。若液柱高度为 h , 此液柱对底面积 A 的总作用力等于液柱的重量。即:

$$pA = hA\rho g$$

$$p = h\rho g$$

或

$$h = \frac{p}{\rho g} \quad (1-5)$$

式中, ρ 为液体密度; g 为重力加速度。

对于选定的液体 (通常是水或汞), ρ 视为常数。这样, 液柱的高度与产生的压力成正比。所以可用液柱的高度代表压力的大小。常用的有 $mmHg$ (毫米汞柱) 和 mmH_2O (毫米水柱)。

水的密度 $\rho_{H_2O} = 1000 kg/m^3$ ($4^\circ C$ 时), 汞的密度 $\rho_{Hg} = 13595 kg/m^3$ ($0^\circ C$ 时)。由式