



高职高专规划教材

# 热工与 流体力学基础

黄敏 主编

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



高职高专规划教材

# 热工与流体力学基础

主编 黄敏

参编 薛梅 韩国军 陈福祥

主审 李丰桐



机械工业出版社

本书是高职高专制冷与空调专业教材编审委员会组织编写的高职高专制冷与空调专业教材。

全书共分三篇。第一篇工程热力学部分，主要讲述了工质的基本概念、热力学第一定律、热力学第二定律、理想气体的热力过程、气体及蒸汽的热力性质、湿空气的性质等内容；第二篇流体力学部分，主要讲述了流体的基本概念、流体静力学知识、流体动力学知识、流动阻力及管路的水力计算等内容；第三篇传热学部分，主要讲述了稳定导热、对流换热、辐射换热三种基本传热方式及复合换热与传热等内容。

本书可作为高职高专制冷与空调专业及暖通等相关专业的热工与流体力学基础教材，也可作为工程技术人员的参考用书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

热工与流体力学基础/黄敏主编. —北京: 机械工业出版社 2003.8  
高职高专规划教材  
ISBN 7-111-12296-8

I. 热... II. 黄... III. ①热工学—高等学校: 技术学校—教材②流体力学—高等学校: 技术学校—教材 IV. ①TK122②035

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 041870 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)  
责任编辑: 倪少秋 版式设计: 冉晓华 责任校对: 李秋荣  
封面设计: 饶 薇 责任印制: 路 琳  
北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行  
2003 年 8 月第 1 版第 1 次印刷  
787mm × 1092mm  $\frac{1}{16}$  · 16.75 印张 · 3 插页 · 391 千字  
定价: 24.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换  
本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646  
封面无防伪标均为盗版

## 编写说明

随着科技发展、社会进步和人民生活水平的不断提高,制冷与空调设备的应用几乎遍及生产、生活的各个方面,运行和维护制冷与空调设备需要大批专门技术人才,尤其我国加入 WTO,融入国际竞争的大潮,社会对制冷空调设备的安装、维修、管理专业高级技术人才的需求量也愈来愈大。为了满足和适应社会不断增长的需要,全国已有数十所高职高专院先后开设了“制冷与空调”专业,以加速制冷与空调专业应用型高级技术人才的培养。

为了编写出既有行业特色,又有较宽覆盖面,适应性、实用性强的专业教材,我们组织了全国十几所不同行业高等院校具有丰富教学和工程实践经验的教师编写了这套高职高专制冷与空调专业规划教材。书目见封四。

本套教材在编写过程中,结合我国制冷与空调专业的发展以及行业对高职高专人才的实际要求,在形式和内容上都进行了有益探索。在专业面向上,既涉及家用、商用制冷与空调设备,又涉及工业制冷空调设备,其覆盖范围广;在内容安排上,既介绍传统的制冷空调原理、方法、设备,又补充了大量的新技术、新工艺、新设备,立足专业最前沿;在课程组织上,基本理论力求深入浅出、通俗易懂,实验、实训力求贴近生产,强调实际、实用;特别强调突出能力培养,体现高职特色,既可作为高职高专院校的专用教材,也可作为社会从业人员岗位培训教材。

本套教材编写过程中,得到了有关设计、施工、管理、生产企业和有关专家学者的大力支持,提出了许多宝贵意见,提供了大量技术资料和工程实例,使得教材内容更加丰富、详实,在此表示衷心感谢!

由于受理论水平、专业能力和知识面的限制,加之时间短促,全套教材中难免有疏漏和错误,恳请广大师生和读者批评指正,以便再版时修订、补充、不断完善和提高。

高职高专制冷与空调专业教材编审委员会

2003年3月

# 前 言

为适应我国高职高专教育发展的需要，我们组织全国高等院校制冷与空调专业的部分骨干教师编写了一套供高职高专使用的制冷与空调专业教材。本套教材结合我国制冷与空调行业的发展和高职高专教育的实际情况，力求反映本行业的新技术、新设备和新工艺，体现高职高专教育的特点，在基本理论的叙述上力求通俗易懂，深入浅出，说理清楚，突出应用性，同时编写了较多的实例，并用相关的实验、实训指导教材配套，加强专业能力的培养。

《热工与流体力学基础》是高职高专制冷与空调专业的主要技术基础课。全书共分三篇，介绍了工程热力学、流体力学及传热学的基础知识。本书编写时以基础知识为主，结合专业实际，加上每章附有的思考题与练习题，使读者能很好地理解并掌握本专业的理论知识。

本书教学内容共需 120 学时，课时分配方案可参考下表：

章次	绪论	一	二	三	四	五	六	七	八	九	十	十一	十二	十三	十四	十五	十六	十七	小计
课时	2	4	10	5	8	6	8	8	4	2	4	10	6	4	4	12	5	9	111
机动课时																			9
总计																			120

本书由江苏经贸职业技术学院黄敏主编，山东商业职业技术学院薛梅、北京联合大学韩国军、陈福祥参编。其中，绪论、第三、五、六、七、八章由黄敏编写，第一、二、四章由薛梅编写，第九、十、十一、十二章由韩国军编写，第十三、十四、十五、十六、十七章由陈福祥编写。

本书由山东商业职业技术学院李丰桐主审。

由于我们水平有限，书中难免有疏漏之处，请读者批评指正，以便再版时修改补充。

作 者  
2003 年 4 月

## 主要符号表

<p><math>c</math> 比热容</p> <p><math>c_p</math> 比定压热容</p> <p><math>c_v</math> 比定容热容</p> <p><math>g</math> 重力加速度</p> <p><math>H</math> 焓, 高度</p> <p><math>h</math> 比焓</p> <p><math>M</math> 摩尔质量</p> <p><math>n</math> 多变指数, 物质的量</p> <p><math>p</math> 绝对压力</p> <p><math>p_0</math> 大气环境压力</p> <p><math>p_b</math> 大气压力, 背压</p> <p><math>p_i</math> 分压力</p> <p><math>p_s</math> 饱和压力</p> <p><math>p_v</math> 真空度, 湿空气中水蒸气分压力</p> <p><math>Q</math> 热量</p> <p><math>q</math> 单位换热量</p> <p><math>q_m</math> 质量流量</p> <p><math>q_v</math> 体积流量</p> <p><math>R</math> 摩尔气体常数</p> <p><math>R_g</math> 气体常数</p> <p><math>S</math> 熵</p> <p><math>S_g</math> 熵产</p> <p><math>S_f</math> (热) 熵流</p> <p><math>s</math> 比熵</p> <p><math>T</math> 热力学温度</p> <p><math>t</math> 摄氏温度</p>	<p><math>t_w</math> 湿球温度</p> <p><math>U</math> 热力学能, 电位差</p> <p><math>V</math> 体积</p> <p><math>v</math> 比体积</p> <p><math>W</math> 体积变化功 (膨胀功)</p> <p><math>W_f</math> 流动功</p> <p><math>W_s</math> 轴功</p> <p><math>W_t</math> 技术功</p> <p><math>w</math> 比体积变化功 (比膨胀功)</p> <p><math>w_f</math> 比流动功</p> <p><math>w_s</math> 比轴功</p> <p><math>w_t</math> 比技术功</p> <p><math>x</math> 干度</p> <p><math>x_i</math> 摩尔分数</p> <p><math>\alpha_v</math> 体膨胀系数</p> <p><math>\kappa_T</math> 等温压缩率</p> <p><math>\gamma</math> 比热容比 (质量热容比)、汽化潜热 <math>l</math> 相变潜热</p> <p><math>\epsilon</math> 制冷系数</p> <p><math>\eta_t</math> 循环热效率</p> <p><math>\kappa</math> 等熵指数</p> <p><math>\mu</math> 动力粘度</p> <p><math>\nu</math> 运动粘度</p> <p><math>\rho</math> 密度</p> <p><math>\varphi</math> 相对湿度</p>
---	---

# 目 录

## 编写说明

## 前言

## 主要符号表

## 绪论 ..... 1

### 第一篇

## 工程热力学 ..... 3

### 第一章 工质及气态方程 ..... 4

#### 第一节 工质及热力系统 ..... 4

#### 第二节 工质的热力状态及基本状态 参数 ..... 5

#### 第三节 平衡状态及状态方程 ..... 8

#### 第四节 理想气体状态方程 ..... 9

#### 思考题与练习题 ..... 12

### 第二章 热力学第一定律 ..... 13

#### 第一节 准平衡过程与可逆过程 ..... 13

#### 第二节 系统总储存能 ..... 15

#### 第三节 系统与外界传递的能量 ..... 15

#### 第四节 热力学第一定律 ..... 18

#### 第五节 理想气体比热容及热量计算 ..... 23

#### 第六节 理想气体热力学能、焓和熵 的计算 ..... 27

#### 思考题与练习题 ..... 29

### 第三章 理想气体的热力过程及 气体压缩 ..... 31

#### 第一节 理想气体基本热力过程 ..... 31

#### 第二节 多变过程 ..... 37

#### 第三节 单级活塞式压气机的工作原 理和理论耗功量 ..... 40

#### 思考题与练习题 ..... 42

### 第四章 热力学第二定律 ..... 45

#### 第一节 热力循环 ..... 45

#### 第二节 热力学第二定律 ..... 46

#### 第三节 卡诺循环及卡诺定律 ..... 47

#### 第四节 熵与孤立系统熵增原理 ..... 50

#### 思考题与练习题 ..... 53

### 第五章 水蒸气 ..... 54

#### 第一节 汽化与凝结 ..... 54

#### 第二节 水的定压加热汽化过程 ..... 55

#### 第三节 水蒸气表和图 ..... 57

#### 思考题与练习题 ..... 60

### 第六章 混合气体和湿空气 ..... 61

#### 第一节 混合气体的性质 ..... 61

#### 第二节 湿空气的性质 ..... 65

#### 第三节 湿空气的焓湿图 ..... 69

#### 第四节 湿空气的基本热力过程 ..... 71

#### 思考题与练习题 ..... 73

### 第七章 气体和蒸汽的流动 ..... 74

#### 第一节 稳定流动基本方程 ..... 74

#### 第二节 气体和蒸汽在喷管和扩压管 中的定熵流动 ..... 75

#### 第三节 喷管中流速及流量的计算 ..... 76

#### 第四节 绝热节流 ..... 80

#### 思考题与练习题 ..... 81

### 第八章 压缩蒸汽制冷循环 ..... 83

#### 思考题与练习题 ..... 85

### 第二篇

## 流体力学 ..... 87

### 第九章 基本概念 ..... 88

#### 第一节 流体的基本概念 ..... 88

#### 第二节 作用于流体上的力 ..... 88

#### 第三节 流体的主要物理性质 ..... 89

#### 思考题与练习题 ..... 94

### 第十章 流体静力学基础 ..... 96

#### 第一节 流体静压强及其特性 ..... 96

#### 第二节 流体静压强的分布规律 ..... 98

#### 思考题与练习题 ..... 104

### 第十一章 流体动力学基础 ..... 108

#### 第一节 流体动力学基本概念 ..... 108

#### 第二节 恒定流连续性方程 ..... 111

第三节 恒定流能量方程 .....	113
第四节 恒定流动量方程 .....	125
思考题与练习题 .....	127
<b>第十二章 流动阻力和能量损失</b> .....	130
第一节 沿程损失和局部损失 .....	130
第二节 层流与紊流、雷诺数 .....	131
第三节 圆管中的层流运动 .....	133
第四节 圆管中的紊流运动 .....	135
第五节 局部损失 .....	142
第六节 减小流动阻力的措施 .....	146
思考题与练习题 .....	147
<b>第十三章 管路的水力计算</b> .....	149
第一节 概述 .....	149
第二节 简单管路 .....	150
第三节 串联与并联管路 .....	152
第四节 管网水力计算基础 .....	154
思考题与练习题 .....	157
<b>第三篇</b>	
<b>传热学</b> .....	161
<b>第十四章 稳定导热</b> .....	162
第一节 导热基本概念及傅里叶定律 .....	162
第二节 通过平壁的稳定导热 .....	165
第三节 通过圆筒壁的稳定导热 .....	168
思考题与练习题 .....	171
<b>第十五章 对流换热</b> .....	173
第一节 对流换热概念及牛顿冷却公 式 .....	173
第二节 相似理论及其应用 .....	177
第三节 管内流体强制对流换热计算 .....	181
第四节 管外流体强制对流换热计算 .....	187
第五节 空间流体自然对流换热计算 .....	191
第六节 沸腾换热 .....	196
第七节 凝结换热 .....	200
思考题与练习题 .....	202
<b>第十六章 辐射换热</b> .....	204

第一节 热辐射的概念 .....	204
第二节 热辐射的基本定律 .....	206
第三节 物体间的辐射换热计算 .....	209
思考题与练习题 .....	216
<b>第十七章 传热与换热器</b> .....	217
第一节 传热过程分析和计算 .....	217
第二节 强化传热和隔热保温技术 .....	226
第三节 换热器及其计算 .....	228
思考题与练习题 .....	234
<b>参考文献</b> .....	235
<b>附录 A</b> .....	237
附录 A-1 饱和水与饱和水蒸气表 (按温度排列) .....	237
附录 A-2 饱和水与饱和水蒸气表 (按压力排列) .....	238
附录 A-3 未饱和水与过热蒸汽表 .....	240
附录 A-4 R717 饱和液体及蒸汽的 热力性质 .....	246
附录 A-5 R12 饱和液体及蒸汽的热 力性质 .....	247
附录 A-6 R22 饱和液体及蒸汽的热 力性质 .....	250
附录 A-7 R134a 饱和液体及蒸汽的 热力性质 .....	252
附录 A-8 R134a 过热蒸汽性质 .....	252
附录 A-9 在 0.1MPa 时的饱和空气状态参数 表 .....	253
附录 A-10 干空气的热物理性质 .....	255
附录 A-11 饱和水的热物理性质 .....	255
附录 A-12 干饱和水蒸气的热物理性 质 .....	256
<b>附录 B</b> .....	258
附录 B-3 湿空气 $h$ - $d$ 图 (大气压力为 $10^5$ Pa) .....	258
附录 B-7 R134a $\lg p$ - $h$ 图 .....	259



# 绪 论

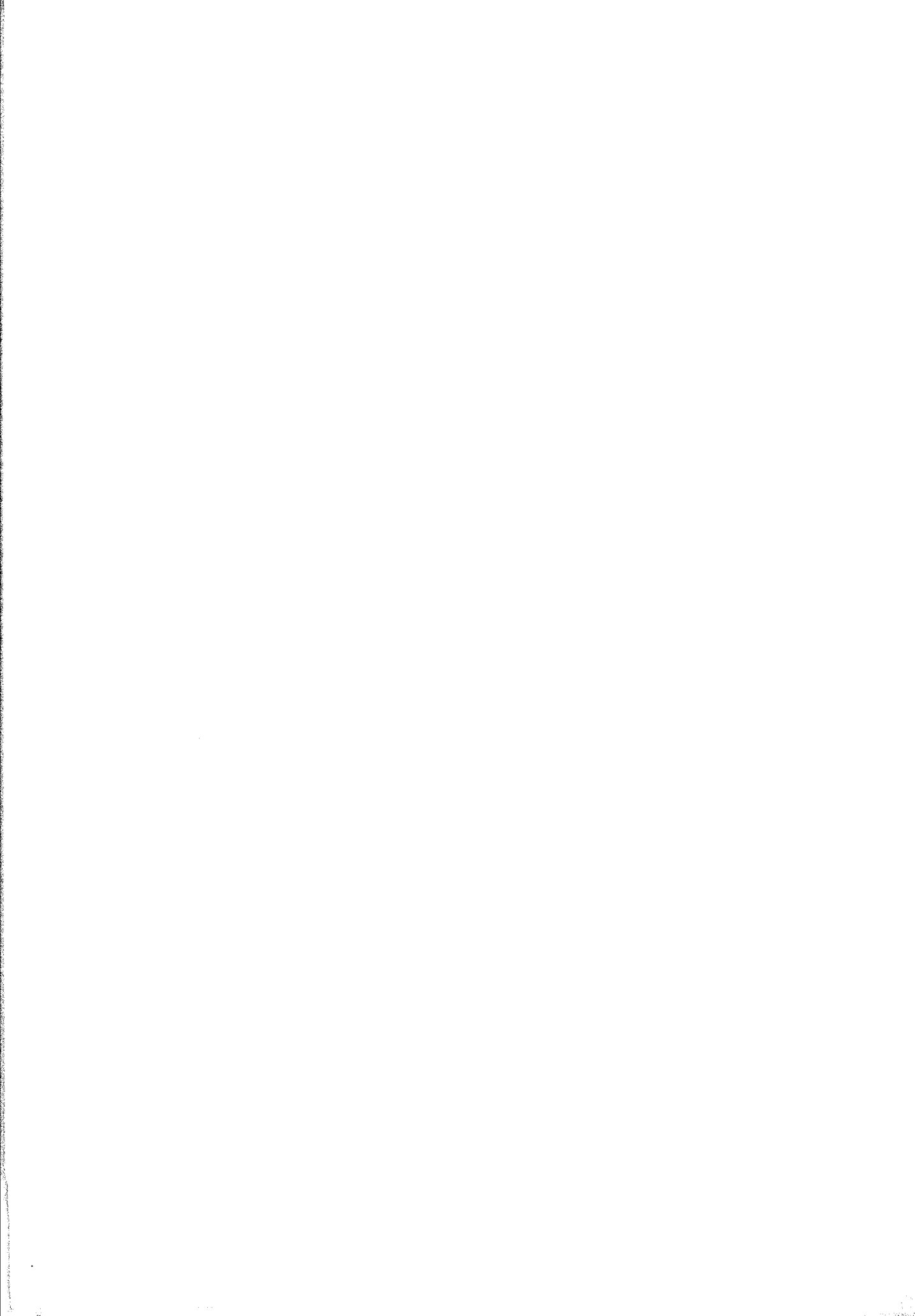
《热工与流体力学基础》是制冷与空调专业和暖通专业的主要专业基础课之一，它由工程热力学、流体力学和传热学三门学科组成。工程热力学的研究对象主要是热能转化为机械能的规律、方法及提高转化效率的途径。流体力学的研究对象是流体的平衡和运动规律，以及在工程应用中力求克服流动阻力减少能量损失。传热学主要研究热传递的规律和方法，以及根据工程需要，研究提高传热效果或削弱传热以减小热损失的方法和途径。

工程热力学的主要内容包括：状态参数、热力系统、平衡状态、热力学第一定律、热力学第二定律等基本概念和基本定律；能量转化规律的分析及计算；水蒸气及湿空气等常用工质的性质等。

流体力学的主要内容包括：流体的基本物理性质；流体静压强基本方程及测压管工作原理；流体稳定流动能量方程及应用；管路阻力及能量损失的分析、计算等。

传热学的主要内容包括：稳定导热、对流换热及辐射换热的分析及计算；强化及削弱传热的途径等。

由于制冷与空调等专业中涉及的诸多理论分析及计算方法都离不开本课程的内容，因此要求学习时明确本课程的主要内容，掌握正确的学习方法，重视每章的思考题与练习题作业，掌握分析问题与解决问题的基本方法，为专业课的学习打好理论基础。



# 第一章 工质及气态方程

本章的主要内容将讨论能量转换过程中所涉及的热力系统、工质的状态特性等基本概念；气体作为能量转换过程中的重要工质，介绍其状态方程。

## 第一节 工质及热力系统

### 一、工质

在热力工程中，能量的转移和转换必须通过某种媒介物质的状态变化来实现，用以实现热能与机械能相互转换或热能转移的媒介物质，称为工质。如汽轮机中的水蒸气、制冷机中的制冷剂等。工质并不直接参与能量的转换，只在能量转换中起着媒介作用，合理地选用工质可提高能量转换的效率。

### 二、热力系统

在工程热力学中，通常把研究的对象从周围物体中划分出来，分析它与周围物体之间的能量和物质交换，这种人为划分出来的研究对象称为热力系统，简称系统。将与系统相互作用的周围物体称为外界或环境。系统与外界之间的分界面称为边界。

系统的边界可以是真实存在的，也可以是假想的；可以是固定的，也可以是移动的。图 1-1a 中，如果取气缸中的气体作为研究对象，则缸内气体就是热力系统。气缸内壁和和塞内表面即构成该系统的真实边界，并且一部分边界是随活塞移动的。图 1-1b 是汽轮机工作原理示意图。在研究汽轮机中的热能与机械能转换问题时，可以取汽轮机外壳及进出口截面所包围的部分为系统。则该系统的边界是固定不变的，并且其中部分边界是真实存在的，例如汽轮机的外壳；还有部分边界是假想的，例如汽轮机的进口截面和出口截面。

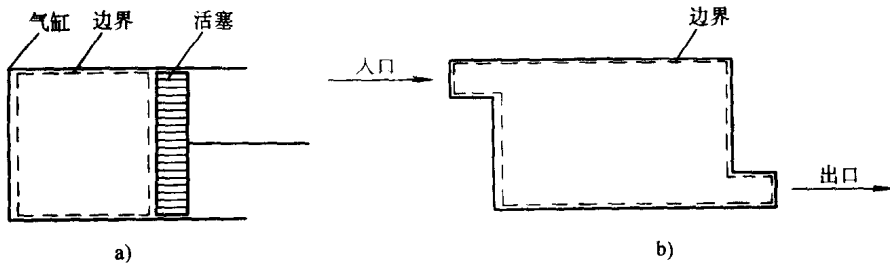


图 1-1 热力系统示意图

a) 闭口系统 b) 开口系统

根据系统与外界的物质或能量交换的特点，可以有不同类型的系统。下面介绍在工程热力学中常用的几种系统。

(1) 闭口系统 系统与外界没有物质交换。如图 1-1a 所示气缸内的气体。由于没有物

第一篇

# 工程热力学

---

- 第一章 工质及气态方程
- 第二章 热力学第一定律
- 第三章 理想气体的热力过程及气体压缩
- 第四章 热力学第二定律
- 第五章 水蒸气
- 第六章 混合气体和湿空气
- 第七章 气体和蒸汽的流动
- 第八章 压缩蒸汽制冷循环

1

质通过边界, 系统的质量保持不变, 故闭口系统又称为控制质量。

(2) 开口系统 系统与外界有物质交换。由于物质通过了开口系统的边界, 所以开口系统的质量可以是变化的, 也可以是不变的。如图 1-1b 所示正在运行的汽轮机, 在进口截面和出口截面处有物质流入流出, 故为一开口系统。由于开口系统通常是一个划定的空间范围, 所以又称控制体积, 或控制体。

(3) 绝热系统 系统与外界无热量交换。一个用完全隔热材料包围起来的系统, 就是绝热系统。

(4) 孤立系统 系统与外界既无能量 (功、热量) 交换又无物质交换。

(5) 热源 热源是一类特殊的系统, 若热源的热容量无限大, 在吸收或放出有限热量时不改变自身的温度, 则称为恒温热源; 若热源的热容量不是非常大, 则称为变温热源。

在工程热力学中, 最常见的热力系统是简单可压缩系统。即系统与外界之间功量的交换只有体积变化功 (膨胀功或压缩功) 一种形式。

## 第二节 工质的热力状态及基本状态参数

### 一、热力状态与状态参数

在热工设备中, 工质完成热能与机械能的转换或热能的转移, 它的压力、温度、体积等物理量会发生变化, 或者说工质本身的状况会发生变化。工质在某一瞬间所呈现的宏观物理状况称为工质的热力状态, 简称状态。描述工质热力状态的一些宏观物理量, 称为热力状态参数, 或简称状态参数。显然状态参数与状态是一一对应关系。工质的状态发生变化, 其状态参数也相应变化, 且初、终态的参数变化值, 仅与初、终态有关, 而与状态变化的过程无关。若以  $x$  表示状态参数, 则有

$$(1) \int_{1-2} dx = x_2 - x_1$$

$$(2) \oint dx = 0 \quad \text{即系统经历一个循环, 其状态参数的数值变化为零。}$$

工程热力学中常用的状态参数有: 温度 ( $T$ )、压力 ( $p$ )、体积 ( $V$ )、热力学能 ( $U$ )、焓 ( $H$ )、熵 ( $S$ ) 等。其中温度、压力、体积是可以直接测量的, 称为基本状态参数。而其余的必须由基本状态参数导出, 称为导出状态参数。

系统的状态参数按其物质数量的关系, 可分为强度性参数和广延性参数两类。强度性参数的数值与系统的质量无关, 反映了系统的内在性质, 如温度、压力。它们不具有可加性, 系统中各点的强度性参数与整个系统强度性参数相同。在热力过程中, 强度性参数起着推动力作用, 故又称之为广义力或势。

广延性参数的数值与系统的质量有关, 反映了系统的外延性质。如体积、焓、熵等。它们具有可加性, 即系统的广延性参数等于其各部分广延性参数之和。在热力过程中广延性参数起着位移作用, 又称为广义位移。

广延性参数除以系统的质量, 得到单位质量的广延性参数, 称为比参数。如: 体积除以质量得到比体积, 还有比热力学能、比焓等, 它们均具有强度性参数的性质。通常, 广

延参数用大写字母表示，其比参数用小写字母表示。

## 二、基本状态参数

### 1. 温度

温度是用来标志物体冷热程度的物理量。根据分子运动论学说，温度是物质分子热运动激烈程度的标志。对于气体，有

$$\frac{m\bar{c}^2}{2} = BT \quad (1-1)$$

式中， $\frac{m\bar{c}^2}{2}$  为分子平移运动的平均动能，其中  $m$  是一个分子的质量， $\bar{c}$  是分子平均运动的均方根速度； $B$  为比例常数； $T$  为气体的热力学温度。

从上式可见工质的热力学温度与工质内部分子平移运动平均动能成正比。温度越高，分子运动速度越快，温度越低，分子运动速度越慢。

当两个温度不同的物体相互接触时，它们之间将发生热量传递。如果不受外界影响，那么经过足够长的时间后，它们将达到相同的温度，即所谓的热平衡状态。如果两个物体中的每一个都分别与第三个物体处于热平衡，则这两个物体彼此也必处于热平衡，这个基本的实验事实又称为热力学第零定律。温度概念的建立以及温度测量都是以热力学第零定律为依据的，当温度计与被测物体达到热平衡时，温度计所指示的温度就是被测物体的温度。

温度的数值标尺称为温标。国际单位制 (SI) 中，采用热力学温标作为基本温标。这种温标确定的温度称为热力学温度，以符号  $T$  表示，单位为 K (开尔文)。热力学温标取纯水的三相点，即冰、水、汽三相平衡共存的状态点为基准点，规定其温度为 273.16K；每 1K 为纯水三相点温度的 1/273.16。

国际单位制中还规定了热力学摄氏温标，它所确定的温度称为摄氏温度，符号为  $t$ ，单位为  $^{\circ}\text{C}$  (摄氏度)。其定义式为

$$t = T - 273.15$$

由此可见，热力学温标和摄氏温标的分度值相同，仅零点不同。在工程上可近似地用下式计算

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

### 2. 压力

单位面积上所受到的垂直作用力称为压力 (即压强)，用符号  $p$  表示，即

$$p = \frac{F}{A} \quad (1-3)$$

式中， $F$  为垂直作用于面积  $A$  上的力。根据分子运动论，气体的压力是大量分子与容器壁面碰撞作用力的统计平均值。压力的大小与分子的动能和分子的浓度有关。

在法定计量单位中，压力的单位为 Pa (帕)， $1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$ 。工程上，由于 Pa 的单位太小，常采用 kPa (千帕) 和 MPa (兆帕) 作为压力的单位，它们之间的关系为

$$1\text{MPa} = 10^3\text{kPa} = 10^6\text{Pa}$$

现已不使用的压力单位还有 bar (巴)、 $\text{mH}_2\text{O}$ 、 $\text{mmHg}$ 、 $\text{atm}$  (标准大气压)、 $\text{at}$  (工程大气压) 等。其换算关系见表 1-1。

表 1-1 压力单位换算表

单位名称	帕〔斯卡〕 (Pa)	工程大气压 (at)	标准大气压 (atm)	毫米汞柱 (mmHg)	米水柱 (mH <sub>2</sub> O)
帕〔斯卡〕(Pa)	1	$1.01972 \times 10^{-5}$	$0.98692 \times 10^{-5}$	$750.062 \times 10^{-5}$	$10.1974 \times 10^{-5}$
工程大气压 (at)	$0.980665 \times 10^5$	1	0.96784	735.56	10.000
标准大气压 (atm)	$1.01325 \times 10^5$	1.03323	1	760.00	10.3323
毫米汞柱 (mmHg)	133.3224	$13.595 \times 10^{-4}$	$13.158 \times 10^{-4}$	1	$13.595 \times 10^{-3}$
米水柱 (mH <sub>2</sub> O)	9806.65	$1 \times 10^{-2}$	$967.81 \times 10^{-4}$	73.5559	1

工程上常用弹簧管式压力表和 U 型管压力表测量气体的压力，如图 1-2、1-3 所示。由于压力表的测量总是在某种环境中进行（通常是大气环境），因此测得的压力值不是气体的实际压力，而是气体的实际压力与当地大气压力之间的差值，是一个相对值。

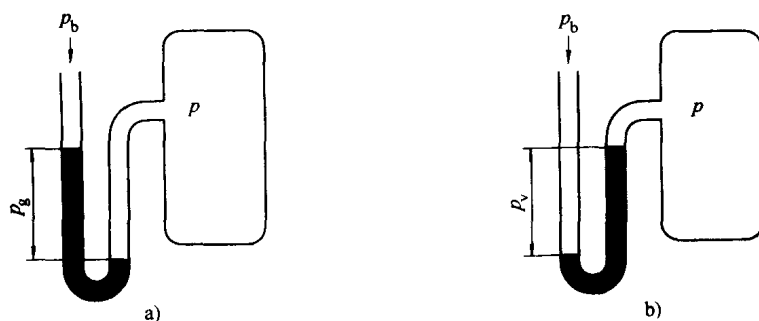


图 1-2 U 型管压力表

气体的实际压力称为绝对压力，用  $p$  表示。当被测气体的绝对压力高于大气压力  $p_b$  时，相对压力为正压，压力表指示的数值称为表压力，用  $p_g$  来表示。当被测气体的绝对压力低于大气压力  $p_b$  时，相对压力为负压，压力表指示的数值称为真空度，用  $p_v$  来表示。由图 1-2 中 a、b 可见它们之间的换算关系。

$$\text{当 } p > p_b \qquad p = p_b + p_g \qquad (1-4a)$$

$$p < p_b \qquad p = p_b - p_v \qquad (1-4b)$$

只有绝对压力才是工质的状态参数，表压力和真空度的数值都与当地大气压有关。它们之间的关系可以用图 1-4 表示。大气压的数值可用气压计测量，随测量地点、时间的不同而变化。当被测气体的压力很高时，可以近似地取大气压为 0.1MPa。

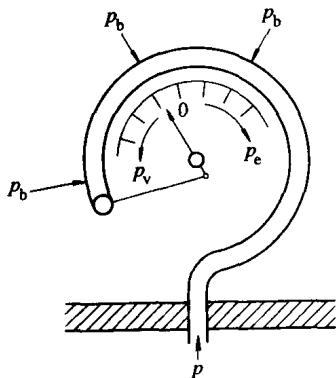


图 1-3 弹簧式压力表

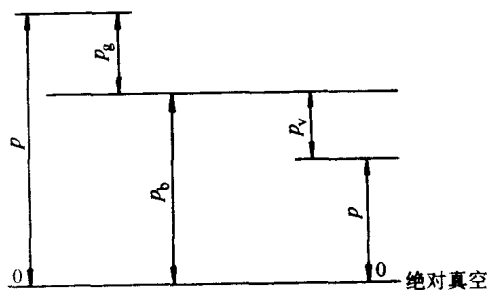


图 1-4 压力间的关系

### 3. 比体积与密度

单位质量的工质所占有的体积称为比体积。用符号  $v$  表示，单位为  $\text{m}^3/\text{kg}$ 。例如质量为  $m$  的工质所占有的体积为  $V$ ，则比体积为

$$v = \frac{V}{m} \quad (1-5)$$

单位体积工质占有的质量称为密度。用符号  $\rho$  表示，单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。显然，比体积与密度互为倒数。即

$$\rho v = 1 \quad (1-6)$$

工质的比体积与密度不是互相独立的参数，任一个都可以单独作为状态参数，表明工质在某一状态下气体的疏密程度。

**【例 1-1】** 某蒸汽锅炉压力表读数为 12.5MPa，凝汽器的真空表读数为 95kPa。若当地大气压  $p_b = 0.101\ 325\ \text{MPa}$ ，试求锅炉及凝汽器的绝对压力。

**【解】** 锅炉中蒸汽的绝对压力为

$$p = p_b + p_g = (0.101\ 325 + 12.5)\ \text{MPa} = 12.601\ 325\ \text{MPa}$$

凝汽器内蒸汽的绝对压力为

$$p = p_b - p_v = (101.325 - 95)\ \text{kPa} = 6.325\ \text{kPa}$$

若题中没有给出当地大气压，则对高压容器取  $p_b = 0.1\ \text{MPa}$ ，此时锅炉内的蒸汽绝对压力为

$$p = p_b + p_g = (12.5 + 0.1)\ \text{MPa} = 12.6\ \text{MPa}$$

计算误差很小，可以忽略。但对凝汽器内的蒸汽，其绝对压力为

$$p = p_b - p_v = (100 - 95)\ \text{kPa} = 5\ \text{kPa}$$

由此引起的相对误差 =  $\frac{6.325 - 5}{6.325} = 20.9\%$

可见，对于低压或负压空间，近似取值会引起很大的误差，必须采用真实大气压力。

## 第三节 平衡状态及状态方程

### 一、平衡状态

用状态参数描述系统状态特性，只有在平衡状态下才有可能，否则系统各部分状态不同就无法用确定的参数值来描述整个系统的特性。例如，当系统内部各处的压力或温度不均匀时，就无法用确定的压力或温度来描述这一状态，这样的状态称为非平衡状态。

系统在不受外界影响的条件下，如果宏观热力性质不随时间而变化，系统内外同时建立了热和力的平衡，这时系统的状态称为热力平衡状态，简称为平衡状态。可见，处于平衡状态的系统其内部各处都是相同的状态，并且不会发生变化，因而可用确定的状态参数加以描述。

### 二、状态公理及状态方程

#### 1. 状态公理

描述平衡状态系统特性的参数有许多，它们可以从不同的角度进行描述，并且互有联



系。当某些参数确定后，系统的平衡状态便完全确定，所有其他状态参数也随之有确定的值。那么，确定系统平衡状态的独立参数究竟需要几个呢？实践经验表明，对于纯物质系统，与外界发生任何一种形式的能量传递都会引起系统状态的变化，且各种能量传递形式可单独进行也可同时进行，于是归纳出一条状态公理。即

确定纯物质系统平衡状态的独立参数 =  $n + 1$

式中  $n$  表示传递可逆功的形式，而 1 表示能量传递中的热量传递。例如，对除热量传递外只有膨胀功（体积功）传递的简单可压缩系统， $n = 1$ ，于是确定系统平衡状态的独立参数为  $1 + 1 = 2$ 。所有状态参数都可表示为任意两个独立参数的函数。

## 2. 状态方程

根据状态公理，对于简单可压缩系统，只需要两个独立的参数便可确定它的平衡状态。例如，在基本状态参数  $p$ 、 $v$ 、 $T$  中，只要其中任意两个确定，另一个也随之确定。三个基本状态参数有如下函数关系

$$\begin{aligned} p &= f(v, T) \\ v &= f(p, T) \\ T &= f(p, v) \end{aligned}$$

表示为隐函数的形式

$$F(p, v, T) = 0 \quad (1-7)$$

以上表示状态参数之间关系的方程式称为状态方程。

## 3. 状态参数坐标图

既然处于平衡状态的系统可以用两个独立的状态参数表示，那这两个参数就可以组成平面坐标图。这种由状态参数所组成的坐标图称为热力状态坐标图。常用的坐标图有压容 ( $p-v$ ) 图和温熵 ( $T-s$ ) 图等。如图 1-5 所示。图上的每一个点都可以确定一个平衡状态，对应有独立的状态参数  $p$ 、 $v$  和  $T$ 、 $s$ 。反之，任一平衡状态也可以在图上找到相应的状态点。而非平衡状态是无法在坐标图上表示的。

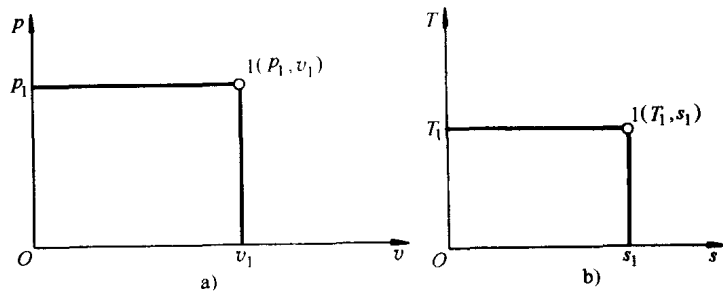


图 1-5 压容图和温熵图

a)  $p-v$  图 b)  $T-s$  图

## 第四节 理想气体状态方程

### 一、理想气体与实际气体

理想气体是一种经过科学抽象的假想气体模型。它被假设为：气体分子是一些弹性的