



教育部职业教育与成人教育司推荐教材配套教材
职业教育电力技术类专业培训用书

热工基础学习指导 与习题集

宋长华 主 编
张友利 副主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



教育部职业教育与成人教育司推荐教材配套教材
职业教育电力技术类专业培训用书

热工基础学习指导 与习题集

主 编 宋长华
副主编 张友利
编 写 黎 兵
主 审 景朝晖



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材配套教材。

本书是为高职高专电力技术类专业学生学习“热工基础”课程而编写的辅导教材。全书共12章,包括:热力学基础知识;热力学第一定律;理想气体的热力性质及基本热力过程;热力学第二定律;水蒸气;蒸汽的流动;蒸汽动力循环;导热;对流换热;热辐射及辐射换热;传热过程;换热器。每章按学习目标与要求、基本知识点、重点难点小结与学习建议、典型例题解析和习题与参考答案五个方面加以阐述。本书遵循高职高专以培养应用型人才为目标的要求,对热工课程的基本要求、基本知识点和重点难点进行了提炼和概括,并结合各章内容提出了学习建议;书中所选例题和习题(共650余题)内容全面、重点突出、分析透彻,可帮助学生理清思路、掌握重点、突破难点,从而提高学生分析和解决实际问题的能力和专业素质。

本书可作为高职高专电力技术类专业学生学习“热工基础”及相关课程配套的学习辅导教材或学习用书,也可作为相关专业教师的教学参考用书,同时可作为电厂职工职业技能培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

热工基础学习指导与习题集/宋长华主编. —北京:中国电力出版社, 2008

教育部职业教育与成人教育司推荐教材配套教材

ISBN 978-7-5083-7061-3

I. 热… II. 宋… III. 热工学—职业教育—教学参考资料 IV. TK122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 060981 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 http://jc.cepp.com.cn)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2008年7月第一版 2008年7月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 13印张 313千字

定价 20.80元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

“热工基础”是高职高专电厂热能动力工程类专业、火电厂集控运行和热工检测与控制技术等专业学生的主干课程之一。本课程包括工程热力学和传热学两部分，共十二章内容，课程教学内容多，概念抽象，理论性强，逻辑严密，公式较多，同时也是一门应用性很强的技术基础课。学生学习过程中常常对本课程的基本要求和重、难点难以把握，概念难以理解，感觉比较难学。鉴于目前学生对“热工基础”课程学习辅导资料和扩大习题量的迫切要求，编者结合多年的教学经验编写本书。本书能更有效地提高学生的学习效率和兴趣，加深学生对热工基础课程的基本概念和基本理论的理解，培养学生分析和解决工程实际问题的能力，从而达到提高学生的专业素质的目的。

本书编写以高职高专培养应用型人才目标为出发点，体现基本知识够用为度，减少理论推导内容及要求，注重理论结论的实际应用，针对学生学习中的问题，力求简明扼要、突出重点。全书共十二章，各章包括了学习目标与要求、基本知识点、重点难点小结与学习建议、典型例题解析和习题与参考答案五个方面。对热工课程的基本要求、基本知识点和重点难点进行了提炼和概括，并结合各章内容提出了学习建议，便于学生预习和复习；各章习题包括填空、名词解释、判断、选择、问答和计算六种题型，全书共 650 余题，并提供了较详细的参考答案，本书例题和习题内容丰富，突出典型性、针对性、实用性，注重知识综合应用能力的培养以及学生分析问题和解决问题的能力培养。

本书由重庆电力高等专科学校宋长华、张友利和黎兵编写。宋长华担任主编，并编写绪论，第七、八、十、十一、十二章，张友利担任副主编，并编写第一～第五章，黎兵编写第六、九章。

全书成稿后，武汉电力职业技术学院景朝晖老师仔细审阅了全稿，提出了许多宝贵的意见和建议。在编写过程中，重庆大学李隆键教授对本书的编写也提出了许多有益的建议。同时，编者参阅了有关院校的文献资料，在此一并表示衷心感谢。

由于编写时间仓促，编者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请读者批评指正，并多提宝贵意见。

编者邮箱：cqdl sch@163.com。

编 者

2008 年 6 月

目 录

前言

绪论	1
0-1 学习目标与要求	1
0-2 基本知识点	1
第一章 热力学基础知识	4
1-1 学习目标与要求	4
1-2 基本知识点	4
1-3 重点难点与学习建议	10
1-4 典型例题解析	10
1-5 习题与参考答案	12
第二章 热力学第一定律	17
2-1 学习目标与要求	17
2-2 基本知识点	17
2-3 重点难点与学习建议	21
2-4 典型例题解析	22
2-5 习题与参考答案	24
第三章 理想气体的热力性质及基本热力过程	29
3-1 学习目标与要求	29
3-2 基本知识点	29
3-3 重点难点与学习建议	37
3-4 典型例题解析	38
3-5 习题与参考答案	41
第四章 热力学第二定律	49
4-1 学习目标与要求	49
4-2 基本知识点	49
4-3 重点难点与学习建议	55
4-4 典型例题解析	55
4-5 习题与参考答案	58
第五章 水蒸气	64
5-1 学习目标与要求	64
5-2 基本知识点	64
5-3 重点难点与学习建议	69
5-4 典型例题解析	70

5-5 习题与参考答案	73
第六章 蒸汽的流动	79
6-1 学习目标与要求	79
6-2 基本知识点	79
6-3 重点难点与学习建议	84
6-4 典型例题解析	85
6-5 习题与参考答案	87
第七章 蒸汽动力循环	93
7-1 学习目标与要求	93
7-2 基本知识点	93
7-3 重点难点与学习建议	99
7-4 典型例题解析	100
7-5 习题与参考答案	103
第八章 导热	110
8-1 学习目标与要求	110
8-2 基本知识点	110
8-3 重点难点与学习建议	118
8-4 典型例题解析	119
8-5 习题与参考答案	121
第九章 对流换热	129
9-1 学习目标与要求	129
9-2 基本知识点	129
9-3 重点难点与学习建议	137
9-4 典型例题解析	139
9-5 习题与参考答案	140
第十章 热辐射及辐射换热	146
10-1 学习目标与要求	146
10-2 基本知识点	146
10-3 重点难点与学习建议	153
10-4 典型例题解析	153
10-5 习题与参考答案	155
第十一章 传热过程	161
11-1 学习目标与要求	161
11-2 基本知识点	161
11-3 重点难点与学习建议	166
11-4 典型例题解析	167
11-5 习题与参考答案	169
第十二章 换热器	174
12-1 学习目标与要求	174

12-2 基本知识点	174
12-3 重点难点与学习建议	180
12-4 典型例题解析	182
12-5 习题与参考答案	183
附录 I 工程热力学主要公式汇总	189
附录 II 传热学主要公式汇总	191
附录 III 部分院校结业考试试题	192
参考文献	200

绪 论

0-1 学习目标与要求

1. 了解能源概念及分类, 热能及利用。
2. 了解火力发电厂的生产过程。
3. 了解热工基础研究的主要内容、特点及分析方法。
4. 了解热工基础课程在本专业中的作用。

0-2 基本知识点

一、能源、能量和热能的利用

1. 能量

能量是物质的属性, 是物质运动的度量。能量有机械能、风能、水能、海浪、潮汐、热能、电能、化学能、原子能、地热等多种形式。

2. 能源

能源是指为人类生产和生活提供各种能量和动力的物质资源, 可以是物质或物质运动。常规能源有: 煤、石油、天然气、水能和核能; 新能源有: 风能、太阳能、生物质能、海洋能等。这些能源中, 除风能、水能、海洋能外, 其他能源往往都需要经过能量的转换, 以热能形式加以利用。能源的转换与利用关系如图 0-1 所示。

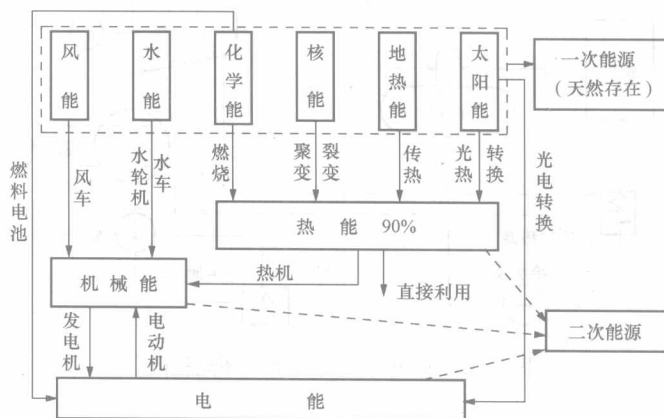


图 0-1 能源的转换与利用关系图

3. 热能及利用

热能: 物质内部所有微观粒子作各种不规则热运动时所具有的能量。

直接利用: 直接将热能用于加热、干燥和供暖等工艺过程和人们生活中。

间接利用：将热能转换为机械能或电能的形式向人们提供动力。

二、火力发电厂的生产过程

1. 火力发电厂的能量转换过程

火力发电厂输入的是燃料的化学能，输出的是电能，在设备中完成以下能量转换过程：



火电厂三大主机及作用：

锅炉：燃料化学能→蒸汽热能

汽轮机：蒸汽热能→机械能

发电机：机械能→电能

2. 生产流程及主要系统

(1) 燃料燃烧及风烟系统

燃运系统：卸煤装置→储煤设施→堆取料机→落煤斗→给煤机→输煤皮带（碎煤机和磁铁分离器）→原煤斗

制粉系统：原煤斗→给煤机→磨煤机→粗粉分离器→细粉分离器→换向挡板→煤粉仓→给粉机→一次风管→燃烧器→炉膛

风烟系统：炉膛←燃烧器←二次风道←

（风）吸风口→冷风道→送风机→暖风器→空预器→热风道→磨煤机→粗粉分离器→细粉分离器→排粉机→燃烧器→炉膛

（烟）炉膛→屏式过热器→对流过热器→再热器→省煤器→空气预热器→除尘器→引风机→烟囱→大气

(2) 火电厂主要汽水流程循环系统（如图 0-2 所示）

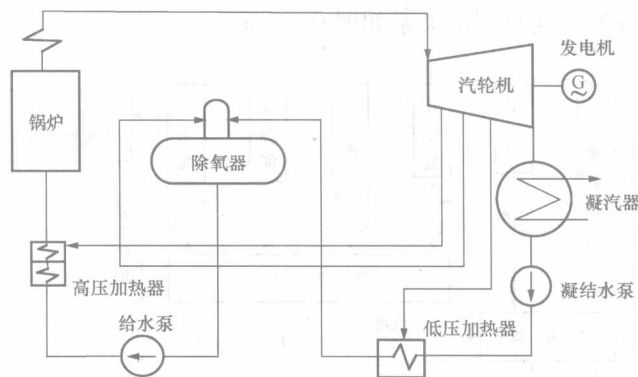


图 0-2 火电厂主要汽水循环流程图

锅炉（自然循环）的给水先进入锅炉尾部的省煤器，被烟气的余热加热后进入汽包，再经炉墙外侧的下降管流入锅炉底部下联箱，而后进入炉膛内由许多水管组成的水冷壁。水在水冷壁内吸收炉膛的热量，被加热直到汽化，汽水混合物沿水冷壁再次进入汽包，经汽包内汽水分离器实现汽和水的分离。分离后的水又通过下降管进入水冷壁继续吸热汽化；而分离出的饱和蒸汽进入过热器，在过热器内继续吸热成为过热蒸汽。高压过热蒸汽经主蒸汽管道引到汽轮机，推动汽轮机转子，使汽轮机高速旋转实现热能转换为机械能。

在汽轮机内做功后的蒸汽（称为乏汽）排入凝汽器，并在其中冷却凝结成水（称为主凝结水）。汇集在凝汽器下部热水井中的主凝结水，用凝结水泵打入低压加热器，预热后再进入除氧器。经除氧器除氧后的主凝结水称为锅炉的给水，借助给水泵升压后，经过高压加热器加热送入锅炉的省煤器，然后又重复上述过程。

低压加热器、除氧器和高压加热器的加热汽源来自于汽轮机的抽汽。

(3) 发电机及电气系统

汽轮机带动发电机，利用切割磁力线产生感应电原理，将原动机的机械能变为电能，再经电厂的变压设备将电能输送到电网。

三、《热工基础》的主要内容及其在专业中的作用

1. 主要内容

本课程包括工程热力学和传热学两部分内容。如表 0-1 所示。

(1) 工程热力学。工程热力学主要研究热能与机械能之间转换的客观规律（热力学基本定律），分析工质的热力性质，应用热工基础理论研究热力过程和热力循环，并进一步探讨提高火电厂循环热效率的方法和途径。本部分包括绪论、热力学基础知识、热力学第一定律、理想气体的性质及基本热力过程、热力学第二定律、水蒸气、蒸汽的流动和蒸汽动力循环共八章内容。

工程热力学的主要内容可归纳为三个方面：①热力学基本概念和基本定律；②工质的热力性质；③热力过程与热力循环。

(2) 传热学。传热学是研究热量传递规律的一门技术学科，主要以分析传热的三种基本方式为基础，进一步研究实际设备的传热特点，以找出提高传热效果或减少传热损失的途径。本部分包括导热、对流换热、热辐射及辐射换热、传热过程和换热器共五章内容。

传热学的主要内容可归纳为四个方面：①导热；②热对流与对流换热；③热辐射及辐射换热；④传热过程与换热器。

表 0-1 热工基础知识体系表（按参考文献 [1] 的章节）

热 工 基 础					
两 篇	工 程 热 力 学			传 热 学	
五部分	基本概念和基本定律	工质的热力性质	热力过程与热力循环	三种基本方式	传热过程和换热器
章 节	第 1 章， 第 2 章， 第 4 章（4-2~4-5）	第 3 章（3-1~3-4）， 第 6 章（6-1~6-3）	第 3 章（3-5）， 第 4 章（4-1）， 第 5 章（5-4）， 第 6 章， 第 7 章	第 8 章， 第 9 章， 第 10 章	第 11 章， 第 12 章

2. 本课程在专业中的作用

“热工基础”课程是电厂热能动力工程类专业、火电厂集控运行和热工检测与控制技术等专业高职高专学生的主干专业技术基础课。火电厂中各种热力设备的设计、制造、安装、运行与检修都要用到该课程的基本理论，因而学好该课程将为学习锅炉、汽轮机、热力发电厂等专业课以及毕业后从事火电厂方面的技术工作奠定重要基础。

热力学基础知识

1-1 学习目标与要求

1. 掌握工质及热力系的概念, 理解热力学分析中采用热力系的目的, 掌握常用热力系(闭口系和开口系)的特点, 会根据实际情况划定热力系(这一点可以在以后各章的习题中加以练习)。

2. 掌握状态参数的特性和三个基本状态参数(温度、压力及比体积)的热力学定义及其物理意义; 掌握热力学温度与摄氏温度之间的换算; 掌握绝对压力、表压力及真空的概念并能熟练地进行不同情况下的绝对压力计算, 会进行不同压力单位间的换算; 掌握比体积与密度之间的关系。

3. 理解平衡状态的概念, 了解保持平衡状态的条件及热力学中研究平衡状态的意义; 了解状态方程的定义及参数坐标图的作用。

4. 理解准平衡过程及可逆过程的概念; 了解分析热力过程常用的分析方法以及准平衡过程和可逆过程在热力学研究中的意义。

5. 掌握功与热量是过程量的性质, 了解体积变化功的计算, 理解 $p-v$ 图上功的表示方法和 $T-s$ 图上热量的表示方法; 理解状态参数与过程量的区别。

1-2 基本知识点

一、热机、工质、热源和冷源

1. 热机

实现热能转换为机械能的设备称为热机。如电厂中的汽轮机、燃气轮机和内燃机、航空发动机等。热机的能量转换关系如图 1-1 所示。

2. 工质

用来实现能量转换的媒介物质, 称为工质。如火电厂中作为工质的水蒸气。

对工质的要求: ①良好的膨胀性; ②流动性好; ③热力性质稳定, 热容量大; ④安全, 对环境友善; ⑤价廉, 易大量获取等。

3. 热源和冷源

高温热源(简称热源): 不断向工质提供热能的物体。如火电厂锅炉炉膛中的高温烟气。

低温热源(简称冷源): 不断接收工质排放剩余热能的物体。如火电厂凝汽器中的冷却水。

二、热力系

1. 定义

被人为确定的热力学研究对象称为热力系,

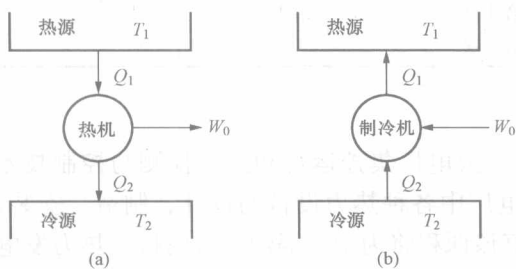


图 1-1 能量转换关系
(a) 热机; (b) 制冷机

简称系统。同时会产生外界和边界两个概念,即

外界:系统以外与之相关的所有物体统称为外界。

边界:系统与外界的分界面称为边界。

2. 典型热力系分类

根据热力系在边界上与外界之间物质和能量的交换情况,常将热力系分为以下几类:

闭口系:在边界上系统与外界无质量交换的热力系 [如图 1-2 (a) 所示]。

开口系:在边界上系统与外界有质量交换的热力系 [如图 1-2 (b) 所示]。

绝热系:在边界上系统与外界没有热量交换的热力系。

孤立系:在边界上系统与外界既没有能量交换也没有质量交换的热力系。

简单可压缩系统:系统和外界在能量上只有热量和体积变化功(膨胀功或压缩功)交换的热力系统。这种系统是工程热力学中最常见的热力系统。

三、工质的状态与状态参数

1. 定义

热力系中工质在某一瞬间所表现出来的宏观物理状况称为状态,描述状态特征的物理量称为状态参数。热力学中常用的状态参数有:温度、压力、比体积、热力学能、焓、熵等,其中最基本的三个状态参数是温度、压力和比体积。

2. 状态参数的特性

(1) 状态参数是状态的单值函数,即状态参数的值仅取决于工质的状态;

(2) 状态参数的变化量与工质经历的途径无关,仅取决于初、终状态,用数学表达式可写为: $\Delta x = \int_1^2 dx = x_2 - x_1$, 式中, x 为任一状态参数;

(3) 当工质从初状态出发经一系列变化又回到原状态时(热力循环),其任何状态参数的变化量为零,即状态参数的循环积分为零,用数学表达式可写为: $\oint dx = 0$ 。

四、基本状态参数

1. 温度

(1) 定义。从宏观上讲,温度是表征物体冷热程度的物理量;从微观来看,温度的高低反映的是物质内部分子作无规则热运动的剧烈程度。

(2) 温标。即温度的数值表示方法。建立温标的两个基本要素是:基准点和分度方法。按其建立的基本要素不同,有不同温标。常用的有两种温标,即

热力学温标:所确定的温度为热力学温度,符号为 T ,单位为 K 。

摄氏温标:所确定的温度为摄氏温度,符号为 t ,单位为 $^{\circ}C$ 。

以上两种温度的换算关系为

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

由于两种温标的每一温度间隔的大小完全一致,只是基准点选取不一样,所以在表示工质两状态间的温度差时,不论采用哪一种温标,其差值都相同,即 $\Delta T = \Delta t$ 。

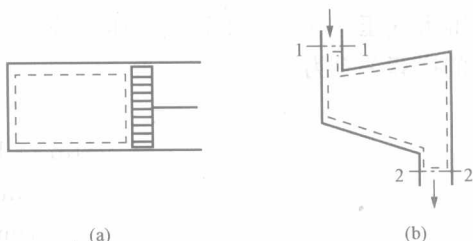


图 1-2 闭口与开口热力系图示

(a) 闭口系统; (b) 开口系统

2. 压力

(1) 定义。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。

(2) 单位。在国际单位制中, 压力的单位为 Pa、kPa 和 MPa, 它们之间的关系为 $1\text{MPa}=10^6\text{Pa}$, $1\text{kPa}=10^3\text{Pa}$ 。另外, 在工程上常使用的压力单位还有 mmHg、mmH₂O、atm (标准大气压) 和 at (工程大气压) 等, 各单位之间可根据式 (1-2) 进行相互换算。它们之间的换算关系为

$$\left. \begin{aligned} p &= \rho gh \\ 1\text{atm} &= 101325\text{Pa} = 760\text{mmHg} \\ 1\text{mmHg} &= 133.3\text{Pa} \\ 1\text{mmH}_2\text{O} &= 9.81\text{Pa} \\ 1\text{at} &= 1\text{kgf/cm}^2 = 98066.5\text{Pa} \approx 0.1\text{MPa} \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

(3) 绝对压力、表压力与真空度。在压力测量中, 测压仪表测得的不是工质的真实压力。由于测压仪表本身处于大气环境中, 所以测压仪表显示的读数 (表压力或真空) 是工质真实压力与当时当地大气压力的差值即称为相对压力。

绝对压力: 工质的真实压力称为绝对压力, 用 p 表示。

大气压力: 大气环境对其环境内物体的作用力, 用 p_b 表示, 用气压计测量。

表压力: 当工质的绝对压力高于大气压力时 (称为正压状态), 测压仪表 (压力表) 显示的是绝对压力高于大气压力的值, 此时仪表的读数称为表压力 [如图 1-3 (a) 所示], 用 p_g 表示, 则有

$$p_g = p - p_b \quad \text{或} \quad p = p_g + p_b \quad (1-3)$$

真空度: 当工质的绝对压力低于大气压力时 (称为负压状态), 测压仪表 (真空计) 显示的是绝对压力低于大气压力的值, 此时仪表的读数称为真空 [如图 1-3 (b) 所示], 用 p_v 表示, 则有

$$p_v = p_b - p \quad \text{或} \quad p = p_b - p_v \quad (1-4)$$

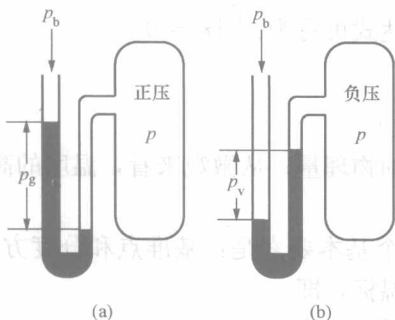


图 1-3 压力测量原理

(a) 表压力; (b) 真空

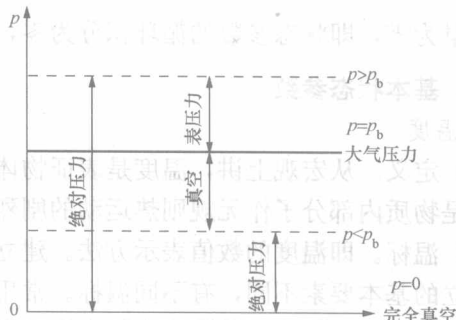


图 1-4 绝对压力、表压力和真空间关系

3. 比体积

(1) 定义。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 m^3/kg 。其定义式为

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

(2) 比体积与密度的关系。比体积与密度互为倒数关系, 即 $\rho v = 1$ 。

注意: 比体积和密度都是说明工质在某一状态下分子聚集疏密程度的物理量, 二者互不独立。

五、平衡状态、状态方程式和参数坐标图

1. 平衡状态

(1) 定义。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平衡状态。

(2) 实现条件。在工程热力学中, 要保持平衡状态需满足以下两个条件:

热平衡: 组成热力系的各部分之间没有热量的传递。

力平衡: 组成热力系的各部分之间没有相对位移。

(3) 研究平衡状态的意义。工程热力学中只研究平衡状态, 因为只有在平衡状态下才能用确定的状态参数来描述工质所处的状态特征。

2. 状态方程式

对于简单可压缩系统, 只需两个独立的状态参数, 便可确定它的平衡状态。例如: 工质的基本状态参数 p 、 v 、 T 中, 只要其中任意两个参数确定, 另一个也随之确定, 即有: $p = f(v, T)$; 表示成隐函数形式为 $f(p, v, T) = 0$, 这种表示状态参数之间关系的方程式称为状态方程式。

3. 参数坐标图

(1) 概念。由两个彼此独立的状态参数分别为横、纵坐标所构成的平面直角坐标图。由于两个独立的状态参数就可以确定简单可压缩系统的状态, 所以, 在以两个独立状态参数为坐标的平面直角坐标图上, 每一点都代表系统的一个平衡状态。热力学中常用的参数坐标图有 $p-v$ 图、 $T-s$ 图和 $h-s$ 图等。

(2) 应用。

点: 图中的点表示平衡状态。

实线: 图中的线表示准平衡过程或可逆过程的过程曲线; 有时为了比较, 在图中用虚线来表示不可逆过程。

面积: 图中的面积可表示功量和热量大小; 还可表示过程进行的方向。后面将结合具体过程应用参数坐标图进行分析。

六、热力过程与热力循环

1. 热力过程

工质从一个平衡状态向另一个平衡状态变化所经历的全部状态的总和称为热力过程, 简称过程。工质与外界的能量和物质交换是通过在热力设备中完成的热力过程来实现的。

2. 热力过程的分类

(1) 按过程中内部状态特点分: 准平衡过程和非平衡过程;

(2) 按过程与外界产生的效果分: 可逆过程和不可逆过程。

工程热力学中常分析两种理想的热力过程, 即准平衡过程和可逆过程。

3. 准平衡过程

(1) 定义。为了便于对实际过程进行分析和研究, 假设过程中系统所经历的每一个状态

都无限地接近平衡状态,这种过程称为准平衡过程,又称为准静态过程;否则为非平衡过程。

(2) 实现条件。如果系统内外的不平衡势差(如压力差、温度差等)不是很大的情况下,系统恢复平衡的速度远大于外界破坏平衡的速度,可以将实际过程近似地看作为准平衡过程。准平衡过程是一种理想化的过程,实际过程只能无限接近准平衡过程。

4. 可逆过程

(1) 定义。如果系统经历了一个过程后,系统可沿原过程的路线反向进行,回复到原状态,而且不给外界留下任何影响,则该过程称为可逆过程;否则为不可逆过程。

(2) 实现条件。

1) 过程是准平衡过程(推动过程的势差无限小);

2) 过程中无任何形式的耗散效应(不可逆因素),如摩擦现象及温差传热等。

(3) 意义。可逆过程是一个理想过程,是一切热力设备工作过程力求接近的目标。可逆过程的概念为热力学分析提供了很大的方便。利用这一概念可以将复杂的实际过程近似简化为一个理想的可逆过程加以研究,然后再加以适当的修正,所以研究可逆过程在理论上具有十分重要的意义。

(4) 可逆过程与准平衡过程的区别。可逆过程要求系统与外界随时保持力平衡和热平衡,并且不存在任何耗散效应,在过程中没有任何能量的不可逆损失;而准平衡过程的条件仅限于系统内部的力平衡和热平衡,准平衡过程在进行中系统与外界之间可以有不平衡势差。

结论:可逆必平衡,平衡不一定可逆;但不平衡一定不可逆,即平衡是可逆的必要条件。

5. 热力循环

工质经一系列热力过程又回到原来状态的封闭热力过程称为热力循环(简称循环),通过循环实现连续的能量转换。(第四章会详细介绍)

七、功和热量

热力系与外界进行能量交换主要是做功和传热两种方式。功是系统与外界交换机械能的量度,热量是系统与外界传递热能的量度。功和热量不是状态参数,而是过程量,与过程的性质有关,只有针对某一个具体过程才有功和热量的概念。

1. 功

(1) 定义。工程热力学中讨论的气体做功是通过气体的体积变化来实现的,即所谓的体积变化功。工程热力学中规定:系统对外做功(膨胀功)时为正功;外界对系统做功(压缩功)时为负功。

(2) 特点。功量是过程量,不是状态参数,其数值大小与初终状态及过程路径有关;功量是迁移量,是热力系通过边界与外界交换的能量。

(3) 符号及单位。

比功: w 或 δw (单位: kJ/kg)

功: W 或 δW (单位: kJ)

工程上也常用千瓦时($\text{kW} \cdot \text{h}$)作为功的单位:

$$1\text{kW} \cdot \text{h} = 1\text{kJ/s} \times 3600\text{s} = 3600\text{kJ}$$

(4) 可逆过程中体积变化功的计算。

$$w = \int_1^2 p dv \quad \text{或} \quad W = \int_1^2 p dV \quad (1-6)$$

(5) 功与 $p-v$ 图。

$p-v$ 图是以压力 p 为纵坐标, 比体积 v 为横坐标的直角参数坐标图。归纳 $p-v$ 图的作用如下:

面积: 如图 1-5 所示, 过程曲线 1-2 在 v 轴上的投影面积 12341 表示的是体积变化功 w 的大小。

方向: $dv > 0$, 功为正, 如图 1-5 中的 1-2 过程; $dv < 0$, 功为负, 如图 1-5 中的 2-1 过程。比体积的变化是气体做功的标志。

因此, $p-v$ 图又称为示功图, 可在 $p-v$ 图上表示功量的大小和正负 (方向)。

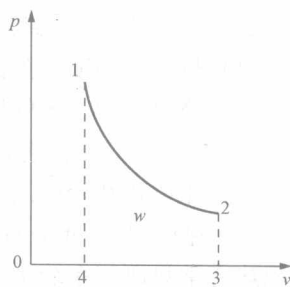


图 1-5 示功图 ($p-v$ 图)

2. 热量

(1) 定义。热力系与外界在温差作用下所传递的热能。工程热力学中规定, 热力系吸热时热量为正, 热力系放热时热量为负。

(2) 特点。热量是过程量, 不是状态参数, 其数值大小与初终状态及过程途径有关; 热量是迁移量, 是热力系通过边界与外界交换的能量。

(3) 符号及单位。

比热量: q 或 δq (单位: kJ/kg)

热量: Q 或 δQ (单位: kJ)

(4) 热量计算与熵。热量和功量都属迁移量, 有类似规律, 热量计算可类比功量计算。

表 1-1 功与热量比较

比较项目	性质	推动力	标志	计算公式 (可逆过程)
功量	过程量	压力 p	比体积变化 dv	$\delta w = p dv$
热量	过程量	温度 T	比熵变化 ds	$\delta q = T ds$

可逆过程, 熵的定义式

$$ds = \frac{\delta q}{T} \quad \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \quad (1-7)$$

可逆过程中热量的计算

$$q = \int_1^2 T ds \quad \text{或} \quad Q = \int_1^2 T dS \quad (1-8)$$

(5) 热量与 $T-s$ 图。 $T-s$ 图是以热力学温度 T 为纵坐标, 熵 s 为横坐标的直角参数坐标图。归纳 $T-s$ 图的作用如下:

面积: 如图 1-6 所示, 过程曲线 1-2 在 s 轴上的投影面积 12341 表示的是热量 q 的大小。

方向: $ds > 0$, 热量为正, 如图 1-6 中的 1-2 过程; $ds < 0$, 热量为负, 如图 1-6 中的 2-1 过程。熵的变化是可逆过程中热力系热量传递的标志。

因此, $T-s$ 图又称为示热图, 可在 $T-s$ 图上表示热量的大小和正负 (方向)。

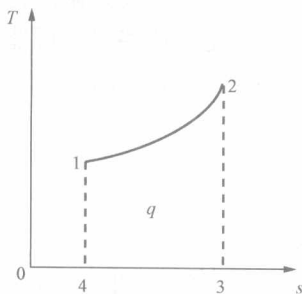


图 1-6 示热图 ($T-s$ 图)

1-3 重点难点与学习建议

一、本章重点

1. 工质和热力系的概念。对工质的基本要求；两种常见热力系（闭口系和开口系）的区别。

2. 三个基本状态参数（ T 、 p 、 v ）的性质：

(1) 热力学温度与摄氏温度间的换算： $T=t+273.15$ 。

(2) 绝对压力、大气压力、表压力及真空度之间的换算：正压时， $p=p_g+p_b$ ；负压时， $p=p_b-p_v$ 。只有绝对压力才是状态参数，表压力和真空度均不是状态参数。

(3) 比体积和密度间的关系： $\rho v=1$ ；比体积和密度不是两个相互独立的状态参数。

3. 平衡状态、准平衡过程及可逆过程的概念。平衡状态具有确定的状态参数，这也是工程热力学只研究系统平衡状态的原因所在。准平衡过程和可逆过程是两种理想过程，特别是可逆过程，它是热力学中非常重要的概念；由于可逆过程进行的结果不会产生任何能量损失，因而可逆过程可以作为实际过程中能量转换效果比较的标准和极限；而实际过程或多或少地存在着各种不可逆因素（如摩擦、温差或力差等），所以实际过程都是不可逆的；为简便起见，通常把实际过程当作可逆过程进行分析计算，然后再用一些经验系数加以修正，这是可逆过程引入的意义所在。

4. 参数坐标图是热力学进行分析计算的一个常用工具，其主要作用有：①坐标图上的一点，表示系统的一个平衡状态；②坐标图上的一条连续实线，表示一个可逆过程或准平衡过程；③在 $p-v$ 图上，可以用过程曲线下的面积表示可逆过程中系统与外界交换的体积变化功的大小，因此 $p-v$ 图又称作示功图；④在 $T-s$ 图上，可以用过程曲线下的面积表示可逆过程中系统与外界传递热量的大小，因此 $T-s$ 图又称作示热图。

二、本章难点

1. 热力系的选取原则，引入绝热系和孤立系的意义。

2. 引入准平衡过程和可逆过程的必要性，以及它们在实际应用时的条件。

3. 熵的定义以及可逆过程中熵变化与热量之间的关系。

4. 状态参数（如 T 、 p 、 v ）与过程量（如 w 、 q ）的区别。

三、本章学习建议

本章主要讨论了工程热力学的基本概念，如热力系、平衡状态、状态参数、可逆过程、功和热量等，对这些概念的理解将在很大程度上影响对本门课程的学习效果。需要强调的是对概念的理解并不意味着死记硬背，而是正确的理解和应用。还需指出的是，这些概念可能在其他课程里接触过，如功和热量，在工程热力学中有相应的扩展、深化，如果掉以轻心，就会造成后面学习的困难。

1-4 典型例题解析

【例 1-1】某火电厂有一台 600MW 机组，锅炉的型号为 DG-2028/17.5-II 3（其中 17.5 指的是锅炉出口蒸汽的表压力为 17.5MPa），汽轮机型号为 N600-16.67/538/538（其