



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 热工基础

(第二版)

童钧耕 王平阳 苏永康 编

上海交通大学出版社

TK122/5=2

2008

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 热 工 基 础

(第二版)

童钧耕 王平阳 苏永康 编

上海交通大学出版社

## 内 容 提 要

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是在第一版的基础上,总结近几年热工教学改革经验修订而成的。

本书是热工技术理论基础教材,分为工程热力学与传热学两部分。工程热力学部分共7章,讲述工程热力学的基本内容,包括基本概念,热力学第一定律和第二定律,气体、蒸汽和湿空气的性质,气体的热力过程,热功转换设备和装置的热力分析及热能合理利用等。传热学部分共4章,讨论传热学的基本内容,包括导热、对流传热、辐射换热的基本规律,传热过程和换热器的基本概念及基本计算方法等。

热工基础知识是工科各类专业人才工程素质的重要组成部分。为适应21世纪人才培养的需要,本书力求做到在传统的经典内容的基础上引进现代热工科技的新成果。同时注意选编了适量的密切联系工程实际的例题、思考题及习题,以培养学生的工程意识,提高学生分析解决实际问题的能力。

本书可作为非能源动力类各专业大学本科40~60学时热工基础、工程热力学与传热学课程教材或教学参考书,也可供有关专业的学生及工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

热工基础/童钧耕,王平阳,苏永康编. —2版. —上海:  
上海交通大学出版社,2008  
ISBN978-7-313-02491-6

I. 热... II. ①童... ②王... ③苏... III. 热  
工学 IV. TK122

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第016926号

### 热工基础

(第二版)

童钧耕 王平阳 苏永康 编

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路877号 邮政编码200030)

电话:64071208 出版人:韩建民

上海交大印务有限公司印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:16.75 插页:8 字数:413千字

2001年1月第1版 2008年3月第2版 2008年3月第5次印刷

印数:3050

ISBN978-7-313-02491-6/TK·065 定价:29.00元

---

版权所有 侵权必究

## 第二版前言

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是在第一版的基础上,根据教育部热工课程教学指导委员会制定的高等工业学校《热工原理教学基本要求》的精神,结合上海交通大学《热工基础》教学大纲并总结上海交通大学及兄弟院校近年来热工课程教学经验修订而成。

本书保持了第一版内容体系,但对部分内容进行了修改,加强了论述的科学性、严谨性,并且根据现代工程与科学技术发展对人才培养的需要,在第一版的基础上作了适当拓宽,特别是传热学的对流传热及辐射换热部分得到了加强,使传热学部分在篇幅上有较大的增加。热工基础理论是伴随着第一次工业革命中热能的利用、热机的发明逐渐形成和发展起来的,所以热工基础的基本内容是以热能利用、热机工作原理为背景展开的。随着科学技术的发展,热科学已深入到机械、冶金、化工、环境、交通运输、电子、信息工程、航空航天及生物医学工程等领域,为推动这些领域进步发挥着重要作用。热工基础理论是现代工程技术人才必备的技术基础知识,是 21 世纪工科类专业人才工程素质的重要组成部分。

全书围绕热能的传递、转换和利用提出了热工理论的基本概念、基本定律及热工问题分析计算的基本方法,并对能量(特别是热量)传递、转换和利用过程的环境问题给予了一定的重视。编者结合长期教学实践经验,在内容选择上注意做到“提高起点,重心后移”。力求做到在正确阐述传统的经典内容的基础上适当引进现代热工科技的新成果。同时注意选编了适量的密切联系我国工程实际的例题、思考题及习题,以培养学生的工程意识,提高学生分析解决实际问题的能力。并且适当地扩大了例题、思考题及习题的专业范围,使本书在内容的深度和广度上适应不同专业人才培养的需要。

本书第 1 章至第 7 章由童钧耕编写,第 8 章、第 9 章由童钧耕和苏永康共同编写,第 10 章和第 11 章由童钧耕与王平阳共同编写,童钧耕担任全书的主编。第二版编写过程中得到吴慧英教授、李艳红副教授、范云良高级工程师和教研组许多同仁的帮助,在此深表谢意。由于编者水平有限,书中有疏漏和不妥之处敬请读者批评指教。

编 者

2007 年 9 月于上海交通大学

# 第一版前言

本书是根据教育部热工课程教学指导委员会制定的高等工业学校《热工原理教学基本要求》的精神,并结合上海交通大学《热工基础》教学大纲编写的。全书共分两部分,第一部分为工程热力学,第二部分为传热学,适用于工科非能源动力类、非热工类各专业教学。

热工原理是讨论热功转换、热能的合理利用和热量传递规律的科学。我国虽然是能源资源的大国,但也是人均能源资源的小国,能源技术落后,利用率低,环境污染严重,极大地制约着国民经济的发展和人民生活水平的提高。因此,每一个高等工业学校的学生,即使不是动力和能源类专业的也应具备一定的热工基础知识,以便在将来的工作中面对与能源特别是热能有关的问题时能采取技术上先进、经济上合理的措施,为我国的能源和环境事业作出贡献。

全书环绕热能的传递、转换和利用提出了热工理论的基本概念、基本定律及热工问题分析计算的基本方法,加强了对能量中可用能、不可逆过程的熵产和做功能力损失等内容的阐述,并对能量传递、转换和利用过程的环境问题给予了一定的重视。编者结合长期教学实践经验,在体系上作了新的安排,并在内容上注意做到“提高起点,重心后移”。

本书第1章至第7章由童钧耕编写,第8章至第11章由童钧耕与卢万成共同编写,全书由童钧耕统稿。编写过程中得到杨强生教授、蒋智敏教授和教研组许多同仁的帮助,在此深表谢意。

由于编者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,敬请读者批评指教。

编者

2000年4月

## 主要符号

|           |                                                                                  |             |                                                |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------|------------------------------------------------|
| $a$       | 热扩散率, $\text{m}^2/\text{s}$                                                      | $q_v$       | 体积流量, $\text{m}^3/\text{s}$                    |
| $A$       | 面积, $\text{m}^2$                                                                 | $R$         | 摩尔气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ |
| $c$       | 比热容(质量热容), $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;<br>声速、光速, $\text{m}/\text{s}$ | $R_g$       | 气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$    |
| $c_f$     | 流速, $\text{m}/\text{s}$                                                          | $R_{g,eq}$  | 平均气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  |
| $c_p$     | 比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$                                     | $S$         | 熵, $\text{J}/\text{K}$                         |
| $c_v$     | 比定容热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$                                     | $S_g$       | 熵产, $\text{J}/\text{K}$                        |
| $C_{p,m}$ | 摩尔定压热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$                                   | $S_f$       | (热)熵流, $\text{J}/\text{K}$                     |
| $C_{v,m}$ | 摩尔定容热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$                                   | $S_m$       | 摩尔熵, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$    |
| $E$       | 总能(储存能), $\text{J}$                                                              | $T$         | 热力学温度, $\text{K}$                              |
| $E_x$     | 焔, $\text{J}$                                                                    | $t$         | 摄氏温度;<br>干球温度, $^{\circ}\text{C}$              |
| $E_{x,Q}$ | 热量焔, $\text{J}$                                                                  | $t_w$       | 湿球温度, $^{\circ}\text{C}$                       |
| $E_{x,U}$ | 热力学能焔, $\text{J}$                                                                | $U$         | 热力学能, $\text{J}$                               |
| $E_{x,H}$ | 焓焔, $\text{J}$                                                                   | $V$         | 体积, $\text{m}^3$                               |
| $h$       | 比焓, $\text{kJ}/\text{kg}$ ;<br>表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$    | $W$         | 膨胀功, $\text{J}$                                |
| $H$       | 焓, $\text{J}$                                                                    | $W_{net}$   | 循环净功, $\text{J}$                               |
| $I$       | 做功能力损失(焔损失), $\text{J}$                                                          | $W_s$       | 轴功, $\text{J}$                                 |
| $J$       | 有效辐射, $\text{W}/\text{m}^2$                                                      | $W_t$       | 技术功, $\text{J}$                                |
| $k$       | 传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$                                     | $W_u$       | 有用功, $\text{J}$                                |
| $M$       | 摩尔质量, $\text{kg}/\text{mol}$                                                     | $w_i$       | 质量分数                                           |
| $M_{eq}$  | 平均摩尔质量, $\text{kg}/\text{mol}$                                                   | $x$         | 干度                                             |
| $n$       | 多变指数;物质的量, $\text{mol}$                                                          | $x_i$       | 摩尔分数                                           |
| $p$       | 绝对压力, $\text{Pa}$                                                                | $z$         | 压缩因子                                           |
| $p_0$     | 大气环境压力, $\text{Pa}$                                                              | $\alpha$    | 吸收比                                            |
| $p_b$     | 大气环境压力, 背压力, $\text{Pa}$                                                         | $\alpha_v$  | 体膨胀系数, $\text{K}^{-1}$                         |
| $p_e$     | 表压力, $\text{Pa}$                                                                 | $\beta$     | 肋化系数                                           |
| $p_i$     | 分压力, $\text{Pa}$                                                                 | $\gamma$    | 比热容比;<br>汽化潜热, $\text{J}/\text{kg}$            |
| $p_s$     | 饱和压力, $\text{Pa}$                                                                | $\epsilon$  | 制冷系数;<br>压缩比                                   |
| $p_v$     | 真空度, 湿空气中水蒸气分压力, $\text{Pa}$                                                     | $\epsilon'$ | 供暖系数                                           |
| $q$       | 热量, $\text{J}/\text{kg}$ ;<br>热流密度, $\text{W}/\text{m}^2$                        | $\eta$      | 肋片效率;<br>动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$      |
| $Q$       | 热量, $\text{J}$                                                                   | $\eta_c$    | 卡诺循环热效率                                        |
| $q_m$     | 质量流量, $\text{kg}/\text{s}$                                                       |             |                                                |

|              |                                        |                                     |                          |
|--------------|----------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| $\eta_{c,s}$ | 压气机绝热效率                                | c                                   | 卡诺循环;冷库参数                |
| $\eta_T$     | 蒸汽轮机、燃气轮机的相对内效率                        | CM                                  | 控制质量                     |
| $\eta_t$     | 循环热效率;<br>肋面总效率                        | cr                                  | 临界点参数;<br>临界流动状况参数       |
| $\kappa$     | 等熵指数                                   | CV                                  | 控制体积                     |
| $\theta$     | 过剩温度, K                                | iso                                 | 孤立系统                     |
| $\lambda$    | 定容增压比;热导率(导热系数), W/(m·K)               | m                                   | 每摩尔物质的物理量                |
| $\pi$        | 压力比(增压比)                               | s                                   | 饱和参数                     |
| $\nu$        | 运动黏度, m <sup>2</sup> /s                | v                                   | 湿空气中水蒸气的物理量              |
| $\nu_{cr}$   | 临界压力比                                  | 0                                   | 环境的参数                    |
| $\rho$       | 密度, kg/m <sup>3</sup> ;<br>预胀比;<br>反射比 |                                     | 特征数                      |
| $\varphi$    | 相对湿度;<br>喷管速度系数                        | $Bi = \frac{hl}{\lambda}$           | 毕渥数( $\lambda$ 为固体的热导率)  |
| $\varphi_i$  | 体积分数                                   | $Gr = \frac{gav\Delta tl^3}{\nu^2}$ | 格拉晓夫数                    |
| $\omega$     | 比湿度, kg(水蒸气)/kg(干空气)                   | $Nu = \frac{hl}{\lambda}$           | 努塞尔数( $\lambda$ 为流体的热导率) |
| $\Phi$       | 热流量, W                                 | $Pr = \frac{\nu}{a}$                | 普朗特数                     |
| 下脚标          |                                        | $Re = \frac{ul}{\nu}$               | 雷诺数                      |
| a            | 湿空气中干空气的参数                             |                                     |                          |

# 目 录

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 绪论                                | 1  |
| 第 1 章 热力学第一定律                     | 6  |
| 1.1 系统和平衡状态                       | 6  |
| 1.2 基本状态参数                        | 9  |
| 1.3 热力学能、焓和熵                      | 12 |
| 1.4 功和热量                          | 15 |
| 1.5 热力学第一定律及其解析式                  | 18 |
| 1.6 稳定流动能量方程式                     | 20 |
| 思考题                               | 23 |
| 习题                                | 23 |
| 第 2 章 气体的性质                       | 27 |
| 2.1 状态方程                          | 27 |
| 2.2 气体的比热容                        | 32 |
| 2.3 理想气体的热力学能、焓和熵                 | 37 |
| 2.4 水蒸气                           | 40 |
| 2.5 水蒸气的定压产生过程                    | 42 |
| 2.6 水和水蒸气热力性质表及水蒸气的焓熵图            | 44 |
| 思考题                               | 47 |
| 习题                                | 48 |
| 第 3 章 理想气体混合气体及湿空气                | 51 |
| 3.1 混合气体的分压力定律和分体积定律              | 51 |
| 3.2 混合气体的成分表示法                    | 52 |
| 3.3 混合气体的比热容、热力学能、焓和熵             | 55 |
| 3.4 湿空气的相对湿度                      | 58 |
| 3.5 湿空气的比湿度和湿度( $\omega$ - $t$ )图 | 62 |
| 思考题                               | 65 |
| 习题                                | 66 |
| 第 4 章 气体的热力过程                     | 67 |
| 4.1 理想气体的基本热力过程                   | 67 |



|                      |            |
|----------------------|------------|
| 4.2 气体热力过程的功及热量      | 72         |
| 4.3 压气机的热力过程         | 75         |
| 4.4 水蒸气的基本热力过程       | 82         |
| 4.5 湿空气的热力过程         | 84         |
| 思考题                  | 87         |
| 习题                   | 88         |
| <b>第5章 热力学第二定律</b>   | <b>90</b>  |
| 5.1 热力学第二定律          | 90         |
| 5.2 卡诺循环和卡诺定理        | 92         |
| 5.3 熵的导出             | 94         |
| 5.4 孤立系统的熵增原理        | 97         |
| 5.5 能量的做功能力、焓        | 100        |
| 思考题                  | 106        |
| 习题                   | 106        |
| <b>第6章 气体与蒸汽的流动</b>  | <b>108</b> |
| 6.1 稳定流动的基本方程式       | 108        |
| 6.2 喷管内流速变化的条件       | 110        |
| 6.3 喷管的计算            | 112        |
| 6.4 绝热节流             | 117        |
| 思考题                  | 119        |
| 习题                   | 119        |
| <b>第7章 循环</b>        | <b>121</b> |
| 7.1 概说               | 121        |
| 7.2 活塞式内燃机循环         | 121        |
| 7.3 活塞式内燃机理想循环的比较    | 126        |
| 7.4 活塞式热机及其循环        | 127        |
| 7.5 燃气轮机装置循环         | 129        |
| 7.6 基本蒸汽动力装置循环——朗肯循环 | 133        |
| 7.7 压缩空气制冷循环         | 138        |
| 7.8 压缩蒸汽制冷循环         | 140        |
| 思考题                  | 145        |
| 习题                   | 145        |
| <b>第8章 导热</b>        | <b>148</b> |
| 8.1 热量传递的基本方式        | 148        |
| 8.2 傅里叶定律和导热系数       | 152        |

|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| 8.3 稳态导热 .....                  | 154        |
| 8.4 非稳态导热 .....                 | 158        |
| 8.5 导热问题的数值解法 .....             | 162        |
| 思考题 .....                       | 165        |
| 习题 .....                        | 166        |
| <b>第9章 对流传热</b> .....           | <b>168</b> |
| 9.1 对流传热的基本概念 .....             | 168        |
| 9.2 对流传热的基本方程组 .....            | 171        |
| 9.3 相似原理和特征数关联式 .....           | 174        |
| 9.4 单相流体管内强迫对流传热特征数关联式 .....    | 176        |
| 9.5 外部强迫对流传热的特征数关联式 .....       | 179        |
| 9.6 大空间自然对流传热 .....             | 183        |
| 9.7 相变换热 .....                  | 185        |
| 思考题 .....                       | 190        |
| 习题 .....                        | 190        |
| <b>第10章 辐射换热</b> .....          | <b>192</b> |
| 10.1 热辐射的基本概念 .....             | 192        |
| 10.2 黑体辐射的基本定律 .....            | 194        |
| 10.3 灰体和基尔霍夫定律 .....            | 197        |
| 10.4 角系数 .....                  | 199        |
| 10.5 组成封闭空间的两灰体之间的辐射换热计算 .....  | 203        |
| 思考题 .....                       | 209        |
| 习题 .....                        | 209        |
| <b>第11章 传热过程和换热器热计算基础</b> ..... | <b>212</b> |
| 11.1 传热过程 .....                 | 212        |
| 11.2 传热的增强和减弱 .....             | 215        |
| 11.3 换热器的基本概念 .....             | 220        |
| 思考题 .....                       | 225        |
| 习题 .....                        | 226        |
| <b>附录</b> .....                 | <b>228</b> |
| 附表1 物理常数和常用单位换算 .....           | 228        |
| 附表2 饱和水和饱和蒸汽的热力性质(按温度排列) .....  | 229        |
| 附表3 饱和水和饱和蒸汽的热力性质(按压力排列) .....  | 231        |
| 附表4 未饱和水和过热蒸汽的热力性质 .....        | 233        |
| 附表5 干空气热物理性质 .....              | 239        |

---

|        |                           |     |
|--------|---------------------------|-----|
| 附表 6   | 在大气压力下烟气热物理性质 .....       | 240 |
| 附表 7   | 部分金属材料的热物理性质 .....        | 241 |
| 附表 8   | 部分非金属和耐火、保温材料的热物理性质 ..... | 242 |
| 附表 9   | 未饱和水与饱和水热物理性质 .....       | 243 |
| 附表 10  | 干饱和水蒸气热物理性质 .....         | 244 |
| 附表 11  | 几种饱和液体的热物理性质 .....        | 245 |
| 习题答案   | .....                     | 247 |
| 主要参考文献 | .....                     | 253 |

# 绪 论

## 1. 热能与机械能的转换

能源是人类赖以生存的物质基础,人类社会的发展,离不开自然界各种能源的开发和利用,能源的开发和利用已成为衡量社会物质文明的重要标志。自然界中蕴藏着各种不同形式的能量,人类迄今已不同程度地开发和利用了自然界的风能、水能、太阳能、燃料的化学能和原子核能等。其中风能和水能是自然界以机械能形式提供的能量,其他能源主要以热能的形式或者转换为热能的形式供人们利用。因此,热能的利用和研究对人类的生产和生活有着巨大的意义。

热能的利用原则上有两种不同的方式:一种是直接利用,即把热能直接用于加热物体,诸如烘干、采暖、冶炼;另一种是动力利用,即把热能转化成机械能或电能,为生产及生活提供动力。这两种利用方式,均需要经过一定热工设备或过程才能实现。

迄今,人类利用得最多的能源之一是燃料的化学能。通过燃烧,燃料的化学能转换成热能,再将热能转换成机械能或电能供人们使用。20世纪60年代以来,人们已开始把原子内部蕴藏的巨大能量通过裂变反应释放出来,加以和平利用。能源的开发利用一方面为人类社会的发展提供了必需的能量,另一方面也造成了对自然环境的破坏和污染。与能源开发利用密切相关的温室效应、酸雨、核废料辐射等对地球的生态系统造成了严重威胁,因此人们正以极大热情关注节能、可再生能源的开发等,努力在满足人类社会对能量需求的同时不破坏或少破坏自然环境,实现可持续发展,为后代留下良好的生存空间。

把热能转换为机械能的整套设备称为热能动力装置,简称热机。燃料在热能动力装置中燃烧,产生热能,热能再转变为机械能。热能动力装置可分为两大类:蒸汽动力装置和燃气动力装置。前者如火力发电厂的蒸汽动力装置及压水堆核动力装置等;后者如内燃机,燃气轮机装置及喷气发动机等。制冷、热泵和空气分离装置等原则上属于机械能转换为热能的设备,在热力学分析上与热能动力装置本质上相似。

图0-1所示为蒸汽动力装置的系统简图。它是由锅炉、汽轮机、冷凝器、泵等组成的热力装置。燃料在锅炉中燃烧,化学能转变为热能,锅炉沸水管内的水吸热后变为水蒸气,并在过热器内过热,成为过热蒸汽。此时蒸汽的温度、压力比外界介质的温度及压力高,具有做功的能力。当蒸汽被导入汽轮机后,先流经喷管,在其中膨胀,压力降低,速度增大。具有一定动能的蒸汽推动汽轮机叶片,使轴转动做功。做功后的排汽(称为乏汽)排入冷凝器,被冷却水冷却,凝结成水,又由泵打入锅炉内加热。如此循环不息,源源不断向外输出功。

图0-2为内燃机的示意图。它主要由气缸及气缸中的活塞所构成。内燃机工作时,活塞做往复运动,并借助连杆和曲柄,使发动机的轴转动,以带动工作机器。把燃料和空气送入气缸中,并使其在气缸中燃烧,由于燃烧产生气体(燃气)的压力和温度大大高于周围介质的压力和温度,燃气在气缸中膨胀,推动活塞,燃烧气体的部分能量就以机械功的形式,通过连杆和曲柄传给轴,变成了轴和飞轮的旋转动能。飞轮所储存的能量中的一部分,用来使活塞做返回运

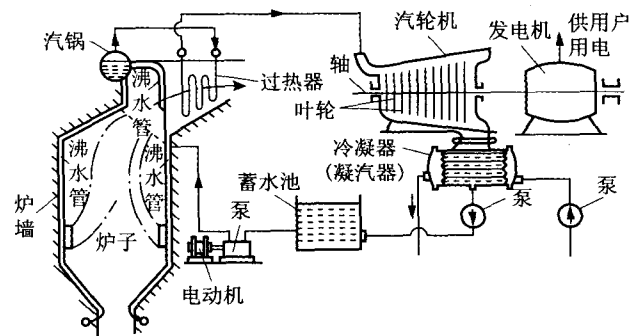


图 0-1 蒸汽动力装置系统简图

动,把做完功的废气排出缸外,并使新的燃料和空气进入气缸。活塞连续不停地做往复运动,内燃机的轴和飞轮不停地旋转,飞轮中所储存能量的剩余部分,也不断地传给工作机器,实现热变为功的过程。

从蒸汽动力装置及内燃机工作过程的简单介绍可以看出,为使热能连续不断地转化为机械能,①必须凭借工质(水蒸气、燃气)作为中间媒介;②工质热力状态发生循环往复的连续变化,源源不断地从热源吸取热量,膨胀做功;③必须向温度较低的物质系统排出一部分热量。

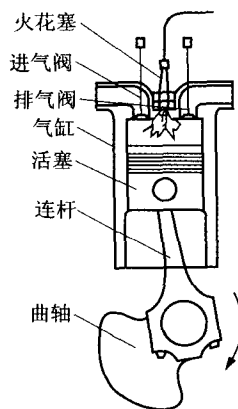


图 0-2 内燃机示意图

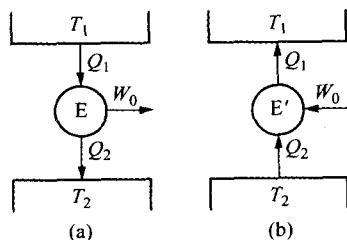


图 0-3 热动力装置抽象图

热动力装置从原理上可进一步抽象为图 0-3(a)所示。其中  $T_1$  表示提供热量的热源;  $T_2$  表示吸收工质排出热量的低温热源(或称冷源);  $E$  表示热机装置,工质在其中循环变化,吸热、膨胀、排热,把热能不断转换成机械功。

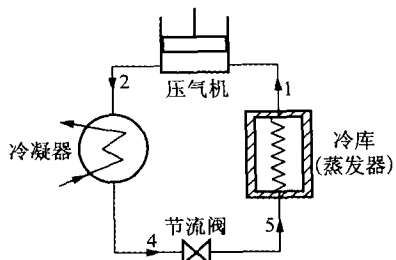


图 0-4 制冷装置系统示意图

制冷装置的目的在于把低温物体的热量向高温物体转移,为此,需外界输入功,热泵是实施从低温物体吸热,向高温物体输送的装置,其原理与制冷装置相同。两种装置工作原理可抽象为图 0-3(b)所示。以制冷装置工作过程为例,如图 0-4,工质在压缩机中压缩,压力、温度升高,接着工质在冷凝器中冷凝,然后,工质通过节流阀温度降低到冷

库温度以下,最后在冷库中吸热汽化,返回压缩机完成循环。如同热能动力装置一样,工质周而复始,吸热、压缩、放热,实施把热能从低温物体传向高温物体。

上面的讨论说明能量利用过程实质上是能量的传递和转换过程。在能量传递中热量的传递不仅在热能动力装置中普遍存在,而且是自然界和生产技术中一种非常普遍的现象。

## 2. 热工理论的研究对象和方法

热工理论就是研究能量转换,特别是热能转换成机械能以及热量传递的规律的科学,是动力和能源工程、航空航天工程、化学工程及机械工程等门类专业的重要的技术基础课。现代能源、环境、航空航天、微电子、信息工程、生物和医学工程、军事等领域内的许多进展都直接或间接建立在热工学科研究进展的基础之上。可以预见在今后的年月里,热工理论的研究仍将在高科技发展中占有重要地位。因此,热工类课程是高等院校工程类专业的重要基础课程,是上述各类专业的学生提高知识层次和自身素质所不可缺少的环节。

热工理论包括工程热力学和传热学两部分。工程热力学主要是研究热能与机械能相互转换的规律及其在热能动力工程中的应用;传热学主要研究热量传递的规律及其工程应用。热工理论为研究热力设备的工作情况及提高转换效率提供必需的理论基础。

工程热力学的主要内容包括:基本概念、热力学第一定律和第二定律、气体和蒸汽的热力性质、热力过程和热力循环等。

传热学的主要内容有:热传导、对流传热、辐射换热和传热过程。

工程热力学中,主要应用热力学的宏观研究方法,把组成物质的大量分子、原子等微粒作为一个整体,研究它所表现出来的宏观性质和规律。它以归纳人类社会实践中无数事实得到的第一定律和第二定律等为基础,通过物质系的压力、温度、体积等宏观参数和受热、冷却、膨胀、收缩等整体行为,运用严密的逻辑推理,对宏观现象和热力过程进行研究,形成有关能量转换,特别是热功转换的理论。这种方法不需要对物质的微观结构作任何假设,而是把与物质内部结构有关的具体性质当作宏观真实存在的物性数据予以肯定,因此分析推理的结果具有高度可靠性和普遍适用性。有时为了解释一些热现象的本质,工程热力学也需引用气体分子运动学说和统计物理的基本观点及研究成果。

传热学以热力学第一定律和热力学第二定律为基础,研究由于存在温差而引起的热量传递规律。工程上的传热问题大致有两类:一类是更有效地增强或削弱热量的传递;另一类着重于确定物体内部温度分布。传热学的研究方法主要有解析法、实验研究法和数值法。解析法是对描述热传递的方程用数学分析的方法求解;实验研究法是利用实验对复杂的热传递过程进行测定,在传热理论的指导下建立经验性的方程;数值法是对难以用解析法求解的热传递方程利用计算机进行求解。这几种方法可以独立运用又可以相辅相成互相补充,尤其是计算机这一强有力的工具在传热领域的广泛应用,使关于传热的研究进一步飞速发展。

工程热力学和传热学各有侧重。例如一杯热水,放在桌上冷却,工程热力学研究可提供热水温度下降到室温放出的热量;传热学则研究热量如何传出、放热过程的快慢等。

## 3. 热工理论发展简史

虽然古代人类早就学会了用火和灭火,但到 17 世纪末还对温度和热量这两个基本概念有错误的认识。在科学界,当时占统治地位的是所谓“热质说”,把热看成是没有重量、可以在物

体中自由流动且具有相互排斥性的“热质”组成的,既不能被创造,也不能被消灭,温度则是热质的强度。直到18世纪末年朗福德(Count Rumford, 1753~1814)观察到钻头钻炮筒时,机械功消耗的结果,使钻头和筒身温度升高;戴维(Humphry Davy, 1778~1829)用两块冰相互摩擦,致使表面融化才对“热质说”造成致命的打击。19世纪中叶,迈耶(Julius Rober Mayer, 1814~1878)提出了能量守恒理论,指出热是能的一种形式,可与机械能相互转化。1842年焦耳(J. P. Joule, 1818~1889)用不同方式测定了热功当量,科学界才彻底抛弃了“热质说”,建立起实质为能量守恒和转换定律的热力学第一定律。

在建立第一定律的前后,基于当时生产实践迫切要求寻找大型、高效的热机,卡诺(Sadi Carnot, 1796~1832)在1824年提出了著名的卡诺定理,指明工作在给定温度范围内热机所能达到的效率极限,这在实质上已建立了热力学第二定律。但因卡诺受“热质说”的影响,它的证明方法是错误的。1850年和1851年克劳修斯(Rudolph Clausius, 1822~1888)和开尔文(Lord Kelvin, 1824~1907)先后提出了热力学第二定律,并在此基础上重新证明了卡诺定理(热力学第二定律),提出能量有品质高低之分,从高品质的能转换为低品质能的过程可自发进行。

热力学第一定律和第二定律奠定了热力学理论基础。1906年能斯特(H. W. Nernst, 1864~1941)根据低温下化学反应的许多实验事实,归纳得出热力学第三定律,指出绝对零度不能达到。第三定律的建立使热力学理论更臻完善。1942年凯南(J. H. Keenan, 1900~1977)在泰特(P. G. Tait, 1831~1901)、吉布斯(J. W. Gibbs, 1839~1903)等前人工作的基础上全面建立了可用能的概念和方法,使对热能装置的分析从能量数量发展到能量的质量方面。

人们在探讨提高热机的功率及效率和更有效利用热能的过程中发现迫切需要対热量传递的基本规律进行深入研究,以便更有效地利用热能。这样就导致了“传热学”的产生和发展。1822年傅里叶(J. Fourier, 1768~1830)总结出热传导定律,奠定了导热理论的基础。他从傅里叶定律和能量守恒定律推出的导热微分方程是导热问题正确的数学描写,成为求解大多数工程导热问题的出发点。他所提出的采用无穷级数表示理论解的方法开辟了数学求解的新途径。在对流研究领域,流体流动的理论是对流传热理论的必要前提,1845年斯托克斯(G. G. Stokes, 1819~1903)改进了纳维(M. Navier, 1785~1836)于1823年提出的流动方程完成了建立流体流动方程基本任务。由于纳维-斯托克斯方程的复杂性,只有极少数简单流动方程才能进行求解。这种局面一直到1880年雷诺(O. Reynolds, 1842~1912)提出了一个对流动有决定性影响的后来被称为雷诺数的量纲为一的物理量群之后才开始有所改观。努塞尔(W. Nusselt, 1882~1957)在1910年和1916年提出的管内换热的理论解及凝结换热理论解对对流传热研究做出了重大贡献,他对强制对流和自然对流的基本微分方程及边界条件进行量纲分析,获得了有关量纲为一的量之间的原则关系,开辟了量纲为一的量原则关系正确指导下,通过实验研究求解对流传热问题的基本方法,有力地促进了对流传热研究的发展。普朗特(L. Prandtl, 1875~1953)于1904年提出的边界层概念,简化了微分方程,有力推进了对流传热微分方程理论求解的发展。1929年的普朗特比拟,1939年的卡门(Th. von Karman, 1881~1963)比拟开始了湍流计算模型的发展历程,湍流计算模型的研究逐渐发展成为传热学研究中的一个热点,有力地推动着理论求解向纵深发展。在热辐射的研究中,19世纪末斯忒藩(J. Stefan, 1835~1893)根据实验确立了黑体辐射力正比于它的绝对温度的四次方的规律,后来在理论上被玻耳兹曼(L. Boltzmann, 1844~1905)所证实。这个规律被称为斯忒藩-玻耳兹曼

定律。1900 年普朗克 (M. Planck, 1858~1947) 总结了维恩 (W. Wien, 1864~1928)、瑞利 (Lord Rayleigh, 1842~1919) 等人对辐射的研究成果, 提出了与经典物理学的连续性概念根本不同的能量子假说, 得出在整个光谱与实际情况完全符合的光谱能量分布公式——普朗克公式, 正确地揭示了黑体辐射能量光谱分布的规律, 奠定了热辐射理论的基础。20 世纪 60 年代电子计算机开始普及, 利用计算机辅助进行传热现象的研究随之兴起, 对传热学的发展作出了卓越的贡献。总之, 自 19 世纪以来“传热学”的发展取得辉煌成果, 而且由于现代能源、机械、环境、航空航天、微电子、信息工程、生物和医学工程、军事等领域内的许多进展都直接或间接建立在传热学科研究进展的基础之上, 可以相信传热学将在广度及深度得到进一步发展。



# 第1章 热力学第一定律

任何形式的能量,既不能消灭也不能创造,只能从一种形式转换成另一种形式,在转换过程中能量的总量保持恒定,这就是能量守恒转换定律。能量守恒与转换定律是人类在长期的生产和科学实践中总结出的一条普遍的自然规律。本章讨论的热力学第一定律就是能量守恒与转换定律在热力系统中的应用。它说明了热能和其他形式的能量,特别是机械能,之间可以相互转换,在转换过程中总能量保持不变。它是热工计算的基础,也是热力学宏观分析法的主要依据。

## 1.1 系统和平衡状态

### 1. 系统

在工程热力学中,为了分析问题方便起见,和力学中取分离体的方法一样,通常把分析的对象从周围物体中分割出来,工程热力学把它们叫做“热力系统”或简称为“系统”、“体系”,与系统发生质量、能量交换的物质系统称“外界”,系统与外界的分界面(线)称为边界(参见图 1-1)。边界可以是假想的或实际的、固定的或移动的(参见图 1-2)。系统通过边界与外界进行质量的交换及热能和机械能或其他形式能量的传递。要实现热能的传递和把热能转化为机械能,需要借助于能够携带热能的工作物质才能实现,这种工作物质在热力工程中被称为“工质”。充当工质的最基本条件是:要有好的流动性和受热后有显著的膨胀性,并有较大的热容量及安全可靠,对环境无破坏作用。工程中最适于充当工质的是:气体或由液态过渡为气态的蒸气,如蒸汽轮机中的蒸汽,内燃机中的燃气,制冷装置中的氟利昂蒸气等。

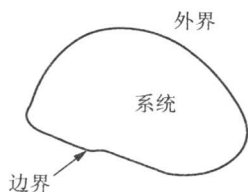


图 1-1 系统、外界和边界

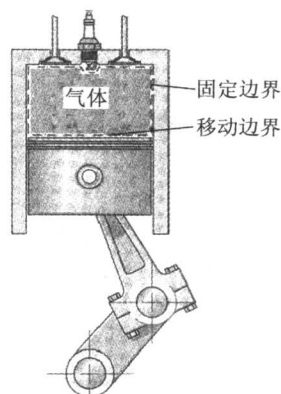


图 1-2 移动边界

与外界只有能量交换而无物质交换的热力系统,称为闭口(或封闭)系统,显然闭口系统的质量保持不变。工程实践中有一类机器,如内燃机,当进气阀关闭后,排气阀尚未开启前,封闭