



普通高等教育农业部“十二五”规划教材
全国高等院校可再生能源工程系列教材



工程热力学

Gongcheng Relixue

刘建禹 主编



 中国农业出版社

普通高等教育农业部“十二五”规划教材
全国高等院校可再生能源工程系列教材

工 程 热 力 学

刘建禹 主编

中国农业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

工程热力学/刘建禹主编. —北京: 中国农业出版社, 2013. 6

普通高等教育农业部“十二五”规划教材 全国高等院校可再生能源工程系列教材

ISBN 978-7-109-17914-1

I. ①工… II. ①刘… III. ①工程热力学-高等学校-教材 IV. ①TK123

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 107203 号

中国农业出版社出版

(北京市朝阳区农展馆北路 2 号)

(邮政编码 100125)

责任编辑 马颀晨

北京中科印刷有限公司印刷 新华书店北京发行所发行

2013 年 6 月第 1 版 2013 年 6 月北京第 1 次印刷

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 14.75 插页: 1

字数: 380 千字

定价: 32.50 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

内 容 简 介

全书共 10 章，内容包括热力学的基本概念、基本定律，气体的热力性质、热力过程及热力循环的分析和计算，气体流动和压缩，动力循环、制冷循环的热力分析，化学热力学基础知识等。本书的特点是在搞清基本概念，获得一定基本理论知识的基础上，着重于应用，着重于对问题的分析和计算。

本书可作为高等院校农业建筑环境与能源工程、新能源科学与工程、能源与动力工程等专业本科生的教材，也可作为农业工程类其他专业以及有关工程技术和管理人员参考用书。

全国高等院校可再生能源工程系列教材

编审委员会

主 任 李文哲（东北农业大学）

副主任 张全国（河南农业大学）

易维明（山东理工大学）

夏朝凤（云南师范大学）

委 员（按姓名笔画排序）

王效华（南京农业大学）

刘圣勇（河南农业大学）

刘庆玉（沈阳农业大学）

刘建禹（东北农业大学）

刘荣厚（上海交通大学）

李 明（云南师范大学）

张衍林（华中农业大学）

周福君（东北农业大学）

柏雪源（山东理工大学）

施正香（中国农业大学）

秦京光（农业部规划设计研究院）

郭康权（西北农林科技大学）

董长青（华北电力大学）

董良杰（吉林农业大学）

主 编 刘建禹

副主编 袁洪印 李 明 徐桂转

编 者 (按姓名笔画排序)

王丽丽 (东北农业大学)

刘建禹 (东北农业大学)

李 明 (云南师范大学)

陈东雨 (沈阳农业大学)

范永存 (东北农业大学)

袁洪印 (吉林农业大学)

徐桂转 (河南农业大学)

主 审 张全国 (河南农业大学)

主 要 符 号 表

英 文 字 母			
A	面积	p_g	表压力
c_f	流速	p_v	真空度, 湿空气中水蒸气分压力
c	比热容 (质量热容), 声速, 余隙百分比	p_i	分压力
c_p	比定压热容	p_s	饱和压力
c_v	比定容热容	p_a	湿空气中干空气分压力
c_n	多变过程比热容	Q	热量, 反应热
C_m	摩尔热容	q	比热量
$C_{p,m}$	摩尔定压热容	q_m	质量流量
$C_{v,m}$	摩尔定容热容	q_v	单位容积制冷量
C'	体积热容	q_0	单位质量制冷量
d	含湿量, 汽耗率	Q_p	定压热效应
E	储存能	Q_v	定容热效应
e	比储存能	R	摩尔气体常数
E_k	宏观动能	R_g	气体常数
E_p	宏观位能	S	熵
$E_{x,Q}$	热量焐	s	比熵
$E_{n,Q}$	热量熵	S_g	熵产
F	力, 自由能	S_f	熵流
g	重力加速度	S_m	摩尔熵
G	吉布斯函数	S_m^0	标准摩尔绝对熵
H	焓	T	热力学温度
h	比焓	t	摄氏温度
H_m	摩尔焓	t_s	饱和温度
L	长度	t_d	露点温度
M	摩尔质量	t_w	湿球温度
m	质量	U	热力学能
m_v	饱和蒸汽的质量	u	比热力学能
m_w	饱和水的质量	U_m	摩尔热力学能
Ma	马赫数	V	体积
n	物质的量, 多变指数	v	比体积
P	功率	W	体积功
p	绝对压力	w	比体积功
p_b	大气压力	W_u	有用功
		w_u	比有用功
		W_l	摩擦耗功

W_r	排斥大气功
W_0	净功
w_0	比净功
ΔW_0	有效能损失
W_t	技术功
w_t	比技术功
W_s	轴功
w_s	比轴功
W_f	流动功
w_f	比流动功
w_i	质量分数
x	干度
y	湿度
x_i	摩尔分数

希腊字母

α	抽汽量
β	临界压力比
γ	比热容比
ϵ	制冷系数, 热湿比, 压缩比
ϵ_c	逆卡诺循环制冷系数
ϵ'	供热系数
ϵ'_c	逆卡诺循环供热系数
η_t	循环热效率
$\eta_{t,c}$	卡诺循环热效率
η_v	容积效率
κ	等熵指数
λ	升压比
π	增压比 (压力比)

ρ	密度, 预胀比
ρ_v	湿空气的绝对湿度
ρ_s	饱和绝对湿度
τ	时间
φ	相对湿度
φ_i	体积分
ξ	热能利用系数

下标符号

a	空气中干空气的参数
c	临界点
cr	临界流动状况的参数
f	流体参数
g	气体参数
i	序号
in	进口参数
iso	孤立系统
n	多变过程物理量
out	出口参数
p	定压过程物理量
re	可逆过程
s	饱和状态参数
s	定熵过程物理量
T	定温过程物理量
u	有用功量
V	定容过程物理量
v	湿空气中蒸汽的物理量
w	水的参数

前 言

热能是人类利用自然界能源的最主要的一种能量形式，几乎所有的工程技术领域都涉及热能利用的问题，能源的开发和利用在很大程度上是热能的开发和利用。目前，随着能源供需矛盾的日趋加剧和环境污染问题的日益突出，研究开发新能源与可再生能源，探索节能减排的新思路、新途径越来越受到重视。因此，了解和掌握有关热能有效利用及传递和转换规律的基础知识是十分必要的。

工程热力学是一门涉及能量转换的基础学科，主要是从工程观点出发，研究热能与机械能或其他形式能量之间的转换规律，研究热能的合理、有效利用技术及方法。这门课程是农业建筑环境与能源工程、新能源科学与工程、热能与动力工程、建筑环境与设备工程等专业的基础课，它既具有较强的理论性和逻辑性，又具有鲜明的工程实践性，在相关专业的教学和人才培养中起着重要的作用。通过本课程的学习，可以使学生掌握有关热能传递与转换的基本知识和基本理论，应用能量传递与转换的客观规律来合理而有效地利用热能，减少能量使用中的浪费和对环境的影响。

本教材是在1991年农业出版社出版的、由东北农业大学陈荣耀教授主编的《工程热力学与传热学》教材的基础上重新编写，基本保持了原有教材的特色和框架体系，并根据当今热工科学技术与高等教育的发展趋势、课程改革的方向，更新了部分内容。教材在知识构成上以能量及能量转换规律为主线，内容包括热力学基本定律、工质的热力学性质和热力过程、热力装置及其循环、化学热力学基础等。

本教材由刘建禹主编，袁洪印、李明、徐桂转、陈东雨、范永存、王丽丽参与编写。全书共分10章，其中绪论、第四章、第九章由刘建禹、范永存编写；第一章由陈东雨编写；第二章、第三章由袁洪印、王丽丽编写；第五章、第八章、第十章由徐桂转编写；第六章、第七章由李明、陈东雨编写。全书由刘建禹教授统稿。教材编写过程中东北农业大学的李文涛、陈泽兴、沙薇、黄丞等研究生做了大量的文稿整理和录入工作。中国农业出版社对本教材的编写也给予了热情的指导，在此一并表示感谢。

本教材由河南农业大学张全国教授审阅，提出了许多宝贵意见，对此表示感谢。

本教材在编写过程中，参考了一些国内外有关资料，在此向各位作者表示深深谢意。由于教材中内容涉及面广，编者水平有限，难免存在错误或不足之处，敬请读者和同行专家批评指正，以使本教材日臻完善。

编 者

2013年1月

目 录

前言

绪论	1
一、能源及热能利用	1
二、工程热力学的研究对象及主要内容	2
三、工程热力学的研究方法	3
第一章 基本概念	4
第一节 热力系	4
第二节 热力系的状态及基本状态参数	6
一、状态与状态参数	6
二、基本状态参数	6
第三节 平衡状态、状态方程式、状态参数坐标图	9
一、平衡状态	9
二、状态方程式与状态参数坐标图	10
第四节 准平衡过程与可逆过程	11
一、准平衡过程	11
二、可逆过程	12
第五节 过程功和热量	14
一、功的热力学定义	14
二、热量	16
第六节 热力循环	17
一、正循环	17
二、逆循环	17
思考题	18
习题	18
第二章 热力学第一定律	20
第一节 热力学第一定律的实质	20
第二节 系统储存能	21
一、内部储存能——热力学能	21
二、外部储存能	22
三、系统总储存能	22

第三节 闭口系统能量方程	22
第四节 开口系统稳定流动能量方程	24
一、稳定流动与推动功	24
二、稳定流动系统能量方程	25
三、技术功	26
四、焓及其物理意义	27
第五节 稳定流动系统能量方程的应用	28
一、动力机械	28
二、压缩机械	28
三、热交换器	28
四、喷管与扩压管	29
思考题	31
习题	32
第三章 理想气体的热力性质和热力过程	34
第一节 理想气体及其状态方程	34
一、理想气体	34
二、理想气体状态方程	35
第二节 理想气体的比热容	36
一、比热容的定义	36
二、比定容热容和比定压热容	37
三、应用比热容计算热量	38
第三节 理想气体的热力学能、焓、熵	40
一、理想气体的热力学能和焓	40
二、理想气体的熵	41
第四节 理想气体的热力过程	45
一、研究热力过程的目的与一般方法	45
二、定容过程	45
三、定压过程	47
四、定温过程	48
五、绝热过程	50
六、多变过程	54
思考题	59
习题	60
第四章 热力学第二定律	63
第一节 热力学第二定律的实质与表述	63
一、热过程的方向性与不可逆性	63

二、热力学第二定律的表述	64
第二节 卡诺循环与卡诺定理	65
一、卡诺循环	65
二、概括性卡诺循环	66
三、逆卡诺循环	66
四、卡诺定理	67
五、多热源的可逆循环	67
第三节 状态参数熵	69
一、熵的导出	69
二、克劳修斯积分不等式	70
三、不可逆过程中熵的变化	71
四、系统熵变化计算小结	72
第四节 孤立系熵增原理与做功能力损失	73
一、孤立系熵增原理	73
二、孤立系做功能力的损失	75
第五节 熵方程	79
一、闭口系熵方程	79
二、开口系熵方程	79
第六节 焓的基本概念	80
一、焓的提出	80
二、热量焓	81
思考题	81
习题	82
第五章 水蒸气	84
第一节 基本知识	84
一、水的汽化	84
二、饱和状态	85
第二节 水蒸气的定压发生过程	85
一、水的定压预热阶段	86
二、饱和水的定压汽化阶段	86
三、干饱和蒸汽的定压加热阶段	87
第三节 水蒸气的表和图	88
一、水及水蒸气状态参数的确定原则	88
二、水及水蒸气的热力学性质表	89
三、水蒸气的焓熵图	91
第四节 水蒸气的基本热力过程	93
一、定容过程	93

二、定压过程.....	93
三、定温过程.....	94
四、绝热过程.....	94
思考题	96
习题	96
第六章 理想气体混合物与湿空气	97
第一节 理想气体混合物	97
一、分压力定律和分体积定律	97
二、混合气体的成分、摩尔质量及气体常数	98
三、理想气体混合物的比热容、热力学能、焓和熵的计算	100
第二节 湿空气的性质	103
一、湿空气的组成及压力	103
二、未饱和空气和饱和空气	103
三、结露和露点	104
四、绝对湿度、相对湿度和含湿量	104
五、焓	105
六、湿空气的比体积	106
第三节 干湿球温度计	107
第四节 湿空气的焓湿图	109
一、 $h-d$ 图的构成及绘制原理	109
二、 $h-d$ 图的应用	111
第五节 湿空气的基本热力过程	113
一、加热过程	113
二、冷却过程	113
三、绝热加湿过程	114
四、定温加湿过程	114
五、湿空气的混合过程	115
六、冷却塔中的热湿交换过程	116
思考题	119
习题	120
第七章 气体（和蒸汽）的流动和压缩	122
第一节 一元稳定流动的基本方程	122
一、连续方程	122
二、能量方程	123
三、过程方程	123
四、声速和马赫数	123

第二节 促使流速改变的条件	124
一、力学条件——压力变化与流速变化的关系	124
二、几何条件——流速变化与截面面积变化的关系	125
第三节 喷管的计算	127
一、定熵滞止参数	127
二、流速的计算	128
三、临界速度和临界压力比	129
四、流量的计算	130
五、喷管形状的选择和尺寸计算	131
六、喷管的设计计算和校核计算	132
第四节 绝热节流	134
第五节 压气机的压气过程	135
一、单级活塞式压气机的压气过程	136
二、活塞式压气机余隙容积的影响	138
三、多级活塞式压气机的压气过程	141
思考题	144
习题	144
第八章 动力循环	147
第一节 蒸汽动力装置循环	147
一、朗肯循环	147
二、提高朗肯循环热效率的基本途径和方法	150
第二节 内燃机循环	154
一、定容加热理想循环	155
二、定压加热理想循环	157
三、混合加热理想循环	158
第三节 燃气轮机循环	161
思考题	163
习题	163
第九章 制冷装置循环	165
第一节 空气压缩制冷循环	165
第二节 蒸气压缩式制冷循环	167
一、蒸气压缩式理想制冷循环——逆卡诺循环	168
二、蒸气压缩式理论制冷循环	168
三、蒸气压缩式理论制冷循环的热力计算	169
四、影响制冷系数的主要因素	171
五、制冷剂的性质	173

第三节 其他制冷循环	174
一、吸收式制冷循环	174
二、蒸气喷射式制冷循环	176
第四节 热泵	177
思考题	178
习题	179
第十章 化学热力学基础	180
第一节 概述	180
一、有化学反应的热力系统	180
二、化学反应的基本热力过程	180
第二节 热力学第一定律在化学反应系统中的应用	181
一、热力学第一定律解析式	181
二、化学反应热效应与燃料热值	182
三、标准生成焓	184
四、绝热理论燃烧温度	187
第三节 热力学第二定律在化学反应系统中的应用	187
第四节 热力学第三定律	189
思考题	189
习题	190
附录	191
附表 1 各种单位的换算关系	191
附表 2 常用气体的摩尔质量、气体常数、低压下的比热容和摩尔热容	192
附表 3 常用气体的平均比定压热容 $c_p _{0^{\circ}\text{C}}^t [\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	192
附表 4 常用气体的平均比定容热容 $c_v _{0^{\circ}\text{C}}^t [\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	193
附表 5 $0 \sim 1500^{\circ}\text{C}$ 范围内常用气体的平均比热容直线关系式 $c _{t_1}^{t_2} = a + \frac{b}{2}t [\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	194
附表 6 空气的热力性质	194
附表 7 氧的热力性质	195
附表 8 氮的热力性质	196
附表 9 氢的热力性质	197
附表 10 二氧化碳的热力性质	198
附表 11 一氧化碳的热力性质	199
附表 12 水蒸气的热力性质 (理想气体状态)	201
附表 13 饱和水与饱和水蒸气热力性质 (按温度排列)	202
附表 14 饱和水与饱和水蒸气热力性质 (按压力排列)	204

附表 15 未饱和水与过热蒸汽热力性质	206
附图 1 水蒸气焓熵图	215
附图 2 湿空气焓湿图	215
附图 3 氨 (NH_3) 压焓图	216
附图 4 氟利昂 134a 压焓图	217
主要参考文献	218

绪 论

一、能源及热能利用

能源是人类社会存在与发展的物质基础，而能源开发和利用的程度又是社会生产发展的一个重要标志。在过去二百多年的能源发展史中，人类依靠煤炭、石油、天然气等矿物质能源取得了经济的飞速发展和科技文化的巨大进步。但发展到今天，随着人类对能源需求的急速增长，加剧了矿物质能源的消耗和枯竭，导致了生态环境的污染和破坏。能源与环境问题已成为当今世界各国面临的重大社会问题之一。

所谓能源，确切而简单地说是自然界中能为人类提供某种形式能量的物质资源。而能量是物质运动的一般度量，根据不同的运动形式有不同的形态。目前，人类认识的能量主要有机械能、热能、电能、辐射能、化学能以及核能。由于能量形式的多样性，能源也有多种形式，如矿物质能（煤炭、石油、天然气）、生物质能、水能、太阳能、风能、地热能、海洋能、核能等。通常把直接存在于自然界而未经加工转化的能源，如太阳能、煤炭、石油、天然气、风能、水能、海洋能、生物质能等称为一次能源；把由一次能源经过直接或间接转化而来的能源，如电力、煤气、汽油、沼气、氢气、酒精等称为二次能源。一次能源中又可根据能否再生分为可再生能源和非再生能源。可再生能源是指那些可以连续再生，不会因使用而逐渐减少的能源，如太阳能、风能、海洋能、生物质能等；非再生能源是指那些储量有限，随着被开发利用而日益减少，最终将会枯竭的能源，如煤炭、石油、天然气等。能源还可以根据开发利用的成熟程度分为常规能源和新能源。如煤炭、石油、天然气、水能等属于常规能源，如太阳能、风能、生物质能、地热能、海洋能、原子核能等属于新能源。在上述这些已为人们发现的可供利用的能源中，除风能、水能和海洋潮汐能是以机械能的形式被人们利用外，其余各种能源则主要都是以热能的形式，或者转换为热能的形式供给人们利用。例如，太阳能是可直接利用的热能；燃料（煤炭、石油、天然气等）常通过燃烧将其化学能释放并转换为热能；核能通过裂变反应或聚变反应释放出高温热能。据统计，经过热能形式而被利用的能量，在我国占90%以上，世界其他国家平均超过85%。因此从某种意义上讲，能源的开发和利用就是热能的开发和利用。

热能的利用有直接利用和间接利用两种基本方式。

直接利用，即将热能直接用于加热物体，以满足各种工艺流程和生活的需要，如烘干、采暖、冶炼、蒸煮等。图0-1是一典型空气太阳能供热系统，它是以空气作为传热介质，利用太阳能集热器收集太阳辐射能并转换成热能，直接用于物料干燥、温室和住宅采暖等。白天

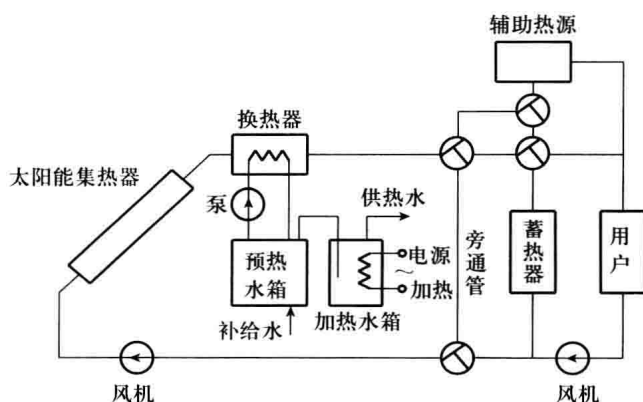


图0-1 典型空气太阳能供热系统