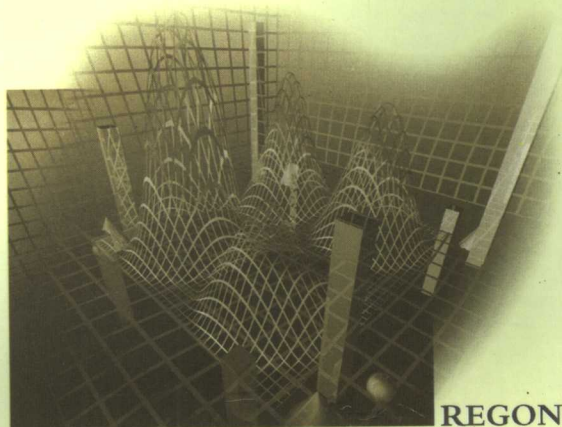


湖南省高等教育 21 世纪课程教材
湖南省高等教育教材建设资助项目

热工理论基础



REGONG LILUN JICHU

主 编 傅俊萍

副主编 衣晓青

主 审 周云龙

湖南师范大学出版社

热工理论基础

江苏工业学院图书馆
藏书章

主 编 傅俊萍

副主编 衣晓青

主 审 周云龙

参 编 傅俊萍 衣晓青 赵渝渝

赵李铁 张翠珍 顾小松

◆ 湖南师范大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

热工理论基础 / 傅俊萍, 衣晓青主编. —长沙: 湖南师范大学出版社, 2005. 8

ISBN 7-81081-532-6

I. 管... II. ①傅... ②衣... III. 热工学—高等学校—教材 IV. TK122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 086113 号

热工理论基础

◇主 编: 傅俊萍

◇副 主 编: 衣晓青

◇责任编辑: 张 豫

◇责任校对: 胡晓军 蒋旭东 黄 晴

◇出版发行: 湖南师范大学出版社

地址/长沙市岳麓山 邮编/410081

电话/0731. 8853867 8872751 传真/0731. 8872636

网址/www.hunnu.edu.cn/press

◇经销: 湖南省新华书店

◇印刷: 长沙海德印务有限公司

◇开本: 730 × 960 1/16

◇印张: 21.5

◇字数: 397 千字

◇版次: 2005 年 9 月第 1 版 2005 年 9 月第 1 次印刷

◇印数: 1—2000 册

◇书号: ISBN 7-81081-532-6/TK·001

◇定价: 35.00 元

前 言

随着专业改革的不断深入,教材建设显得越来越重要.根据我校自动化专业(电厂热工自动化方向)、热能动力专业、建筑环境与设备工程专业教学的需要,我们从2002年开始对上述专业的专业基础课“热工理论基础”进行了调整和改进.我们将工程热力学、工程流体力学和传热学几部分内容整合在一起,形成一套热工理论基础的讲义,既解决教学的急需,又方便学生学习.这一模式得到了学院、学校的认可和支持,同时得到了其他兄弟学院的肯定.2003年,学校推荐参加湖南省教育厅组织的评审,该讲义正式列入“湖南省高等教育21世纪课程教材”建设项目.

经过立项后一年多的教学实践和反复修改,现正式出版呈现在读者面前.该教材突出了三门课程的基本概念和基本定律,力求严谨、精练、准确.与同类教材相比,本教材除对热工理论的基本内容进行详细讲解外,还注意扩大学生的专业知识面,培养学生的工程概念及分析问题和解决问题的能力.根据学生所学专业,我们精选了部分思考题和习题.本教材可作为热工自动化专业、机械制造、交通运输、应用化学等非动力类专业基础课教材,也可作为热能动力专业和建筑环境与设备工程专业的参考教材.由于时间仓促,使用时间和范围均有限.因此,本教材无论从体系到观点,从形式到内容,都可能存在这样那样的不足,敬请各位使用者批评指正,我们将在下次再版时予以修正.

本书第1~6章由赵渝渝编写,第7章、第8章由赵李铁编写,第10~14章由衣晓青编写,第15~19章由傅俊萍编写.其中,第1~4章由赵李铁修改,第5章、第6章由傅俊萍修改.第9章由张翠珍修改,另外,顾小松参与了教材文字和公式的整理工作.全书最后由傅俊萍、衣晓青审阅定稿.

在编写过程中,我们广泛学习借鉴本专业、本课程相关教材已有的成果,并根据我们的教学和教改成果,努力进行创新.中南大学周子民教授在本教材立项和完稿时,对本教材的建设予以充分肯定并提出十分宝贵的指导性意见.全书由东北电力学院周云龙教授主审.在此,一并表示衷心的感谢!

编 者

2005年3月10日

内容提要

本书是湖南省高等教育 21 世纪课程教材,是热工系列课程建设与改革的研究成果。

本书由工程热力学、工程流体力学、传热学三部分组成。工程热力学部分主要介绍热力学的基本概念和基本定律、理想气体与水蒸气的热力性质和基本热力过程,介绍并分析了蒸汽动力循环和气体动力循环的特点及提高循环的方法和途径。工程流体力学是研究流体处于平衡、运动和流体与固体之间相互作用的力学规律和运动规律,以及这些规律在实际工程中的应用。它研究流体绕过某种物体或流过某种通道时的速度分布、压强分布、能量损失及流体同固体间的相互作用。作为基础和满足工程实际需要,它也研究流体平衡时的条件及其压强分布规律。传热学部分主要介绍了稳态导热、非稳态导热、对流量、凝结换热和沸腾换热、辐射换热的基本原理和定律。分析并介绍了传热的强化和削弱、传热量的计算方法和传热的实际应用。

本书在保持原有热工理论基础的基本体系和内容的前提下,对上述三个部分的内容进行了调整,力求科学性、实用性和系统性的统一。

本书使用国家法定计量单位。

本书可做为热工自动化专业及非动力类专业 70 ~ 90 学时的本科教材,也可供动力类专业及有关工程技术人员参考。

主要符号

拉丁字母:

A	面积, m^2
a	导温系数, m^2/s ; 音速, m/s
b	宽度, m
c	比热容(质量热容), $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; 流速, m/s .
c'	容积比热容, $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
c_v	比定容热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_p	比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
C_m	摩尔比热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
C_p	压强系数
d	耗汽率, kg/s ; 直径, m ; 相对密度
d_e	当量直径, m
E	总能(储存能), J ; 辐射能, W/m^2
E_k	宏观动能, J
E_p	宏观势能, J
F	力, N
f	单位质量力; 旋涡脱落频率($1/\text{s}$)
G	投入辐射, W/m^2
g	重力加速度
H	焓, J ; 距液面距离, m
h	质量焓, J/kg ; 对流换热表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
J	有效辐射, W/m^2
K	体积模量, N/m^2
k	传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; 压缩系数, m^2/W
l	长度, m ; 特征长度, m
M	摩尔质量, kg/mol
m	质量, kg
n	多变指数
p	压强, Pa
p_g	表压强, Pa

p_a	大气压强, Pa
p_v	真空度, Pa
p_s	饱和压力, Pa
Q	热量, J
q	面积热流量, W/m^2
q_m	质量流量, kg/s
q_v	体积流量, m^3/s
R	通用气体常数, $J/(mol \cdot K)$; 半径, m
R_g	气体常数, $J/(kg \cdot K)$
R_h	水力半径, m
r	半径, m
S	熵, J/K
s	比熵, $J/(kg \cdot K)$;
T	热力学温度, K
t	摄氏温度, $^{\circ}C$; 时间, s
t_s	饱和温度, $^{\circ}C$
U	热力学能, J
u	质量热力学能, J/kg
V	体积, m^3
v	比体积(比容), m^3/kg ; 流速, m/s ; 平均速度, m/s
W	功, J; 膨胀功, J
W_t	技术功, J
W_s	轴功, J
W_o	循环净功, J
w	比功, J/kg; 膨胀功, J/kg
w_t	比技术功, J/kg
w_s	比轴功, J/kg
w_o	比循环净功, J/kg
x	干度
x, y, z	苗卡尔坐标
α_r	体膨膨胀系数, K^{-1}
α, β, θ	角度
δ	厚度, m; 边界层厚度, m
ε	制冷系数

ε'	供暖系数
ζ	局部阻力系数
η_t	热机循环热效率
η_c	卡诺循环热效率
η_f	肋效率
θ	过余温度, $^{\circ}\text{C}$
λ	沿程阻力系数; 导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; 压力升高比
μ	动力粘性系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$
ν	运动粘性系数, m^2/s
π	增压比
ρ	密度, kg/m^3 ; 膨胀比
σ	黑体辐射常数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
τ	时间, s ; 切向应力, N/m^2
Φ	热流量, W
ϕ	势函数
χ	湿周
ψ	流函数
Ω	立体角, Sr
ω	旋转角速度, $1/\text{s}$
$Bi = \frac{hl}{\lambda}$	毕渥数
$Fo = \frac{a\tau}{l^2}$	傅里叶数
$Gr = \frac{g\alpha_l \Delta t l^3}{\nu^2}$	格拉晓夫数
$Nu = \frac{hl}{\lambda}$	努塞尔数
$Pr = \frac{\nu}{a}$	普朗特数
$Re = \frac{v \cdot l}{\nu}$	雷诺数

目 录

第一篇 工程热力学

第1章 热力学的基本概念	(2)
1.1 工质及热力系	(2)
1.2 热力系的宏观描述	(3)
1.3 基本状态参数	(4)
1.4 热力过程及热力循环	(8)
思考题	(12)
习 题	(13)
第2章 热力学第一定律	(14)
2.1 循环过程、热力学第一定律	(14)
2.2 闭口系统的热力学第一定律表达式	(15)
2.3 开口系统的热力学第一定律表达式	(16)
思考题	(21)
习 题	(22)
第3章 热力学第二定律	(24)
3.1 热力学第二定律的表述	(24)
3.2 卡诺定理与卡诺循环	(25)
3.3 熵	(28)
3.4 孤立系统熵增原理	(31)
思考题	(36)
习 题	(36)
第4章 理想气体的性质及其热力过程	(38)
4.1 理想气体状态方程式	(38)
4.2 理想气体的比热、热力学能、焓和熵	(40)

4.3 理想气体的热力过程	(44)
思考题	(54)
习 题	(54)
第5章 水蒸气	(56)
5.1 水蒸气的产生过程	(56)
5.2 水蒸气的状态参数	(59)
5.3 水蒸气的基本热力过程	(63)
思考题	(64)
习 题	(64)
第6章 蒸汽动力循环	(66)
6.1 蒸汽动力装置的基本循环——朗肯循环	(66)
6.2 再热循环	(70)
6.3 回热循环	(72)
6.4 热电联供循环	(75)
思考题	(76)
习 题	(76)
第7章 气体的流动	(78)
7.1 稳定流动时气流的基本方程式	(78)
7.2 管内定熵流动的基本特性	(79)
7.3 气体的流速及临界流速	(81)
7.4 气体的流量和喷管计算	(84)
7.5 喷管效率	(87)
7.6 绝热滞止	(88)
思考题	(89)
习 题	(89)
第8章 气体动力循环	(91)
8.1 活塞式内燃机的理想循环	(91)
8.2 燃气轮机装置循环	(96)
8.3 增压内燃机及其循环	(97)
思考题	(98)
习 题	(98)

第二篇 工程流体力学

第9章 流体及其物理性质	(101)
9.1 流体的定义和连续介质模型	(101)
9.2 流体的压缩性和不可压缩流体	(102)
9.3 流体的粘性和理想流体	(105)
9.4 作用在流体上的力	(107)
思考题	(109)
习 题	(109)
第10章 流体静力学	(111)
10.1 静止流体的表面力特性	(111)
10.2 流体静力学的基本方程	(112)
10.3 压强的测量方法	(115)
10.4 静止液体作用在平面上的总压力	(117)
10.5 静止液体作用在曲面上的总压力	(120)
思考题	(123)
习 题	(123)
第11章 流体力学的基本概念和基本方程	(126)
11.1 研究流体流动的方法	(126)
11.2 流体流动的基本概念	(129)
11.3 流体微团运动分析	(131)
11.4 纳维-斯托克斯方程	(135)
11.5 理想流体的运动微分方程	(138)
11.6 系统与控制体	(139)
11.7 连续性方程	(142)
思考题	(144)
习 题	(144)
第12章 不可压缩流体的一维流动	(146)
12.1 理想流体伯努利方程及应用	(146)
12.2 动量方程及应用	(152)
12.3 流体的流动状态	(155)
12.4 粘性流体总流的伯努利方程	(158)
12.5 圆管中流体的层流流动	(162)
12.6 圆管中流体的紊流流动	(166)

12.7	沿程阻力系数的计算	(171)
12.8	非圆形管道沿程损失的计算	(174)
12.9	局部损失计算	(175)
12.10	综合应用	(180)
	思考题	(184)
	习 题	(185)
第13章	不可压缩流体的平面流动	(189)
13.1	平面流动的伯努利方程	(189)
13.2	速度势函数和流函数	(190)
13.3	基本的平面有势流动	(194)
13.4	有势流动的叠加	(197)
13.5	边界层的概念	(205)
13.6	边界层分离和卡门涡街	(207)
13.7	绕流物体的阻力	(210)
	思考题	(212)
	习 题	(212)
第三篇 传热学		
第14章	热量传递的基本方式	(215)
14.1	导热	(215)
14.2	对流	(216)
14.3	辐射换热	(217)
14.4	传热过程简介	(218)
	思考题	(219)
	习 题	(219)
第15章	稳态导热	(221)
15.1	导热的基本定律	(221)
15.2	导热微分方程	(224)
15.3	通过平壁、圆筒壁的稳态导热	(226)
15.4	通过肋片的导热	(230)
	思考题	(235)
	习 题	(236)
第16章	非稳态导热	(238)
16.1	一维非稳态导热问题的求解	(238)

16.2 集总参数法	(243)
思考题	(246)
习 题	(246)
第 17 章 对流换热	(248)
17.1 对流换热概述	(248)
17.2 对流换热热边界层及换热微分方程式	(251)
17.3 强迫对流换热特征关联式	(252)
17.4 自然对流换热及其实验关联式	(260)
17.5 凝结与沸腾换热	(263)
思考题	(266)
习 题	(266)
第 18 章 辐射换热	(268)
18.1 热辐射的基本概念	(268)
18.2 黑体辐射基本定律	(270)
18.3 实际物体的辐射特性、基尔霍夫定律	(272)
18.4 角系数的定义、性质及计算	(277)
18.5 被透明介质隔开的两固体表面和多固体表面间的辐射换热	(282)
思考题	(289)
习 题	(289)
第 19 章 传热过程及换热器	(291)
19.1 传热过程的分析和计算	(291)
19.2 传热的强化与削弱	(295)
19.3 换热器及其热计算	(297)
思考题	(301)
习 题	(301)
附 录	(304)
附表 1 常用单位换算	(304)
附表 2 一些气体的摩尔质量、气体常数、低压下的比热容和摩尔热容	(305)
附表 3 常用气体的平均比定容热容	(306)
附表 4 饱和水与饱和水蒸气的热力性质(按温度排列)	(307)
附表 5 饱和水与饱和水蒸气的热力性质(按压力排列)	(310)
附表 6 未饱和水与过热水蒸气的热力性质	(313)
附表 7 保温、建筑及其他材料的密度和导热系数	(320)

附表 8	几种保温、耐火材料的导热系数与温度的关系	(321)
附表 9	金属材料的密度、比热容和热导率	(322)
附表 10	干空气的热物理性质	(324)
附表 11	大气压力($p = 1.01325 \times 10^5$ Pa)下烟气的热物理性质 ...	(325)
附表 12	饱和水的热物理性质	(325)
附表 13	在标准大气压下常用液体的物理性质	(327)
附表 14	在标准大气压和 20 °C 下常用气体性质	(327)
参考文献		(328)

第一篇

工程热力学

热力学是一门研究能量的储存、转化和转移的科学。能量储存形式有：热力学能、动能、势能和化学势能等。能量会从一种形式转化到其他的形式。能量以热或功的方式穿越边界进行转移。工程热力学就是研究热能和机械能之间的相互转换问题的科学，这些转换是通过工质在热力设备中循环变化过程来实现的。这种转换所必须遵循的基本规律是热力学第一、二定律，它们是工程热力学的理论基础。工程热力学研究的主要内容除这两大定律之外，还包括工质的热力性质、热力过程、热力循环，以及提高能量转换经济性的途径和技术措施。从辩证唯物主义的观点出发，各种能量的转化和转移都是物质运动的结果，而物质与运动是不可分割的，因此，物质及其性质就成为热力学的重要主题之一。工程热力学的很多规律都建立在实验观察的基础上，这些实验观察到的现象被总结成数学表述或定律，热力学第一定律和第二定律就是其中应用较为广泛的两个定律。

对于工程师来说，学习热力学的目标常常是为了分析和设计一个大的系统——从一个空调器到一个火电站以及一个核电站的热力系统。这种系统可以看作是连续介质。在连续介质中，大量分子的平均运动的结果在宏观上表现为可以测量的参数，如压力、温度和比容。本书将仅限于宏观或工程热力学的范畴；如果要研究单个分子的运行行为，请查阅统计热力学方面的资料。

第1章 热力学的基本概念

1.1 工质及热力系

要实现热能与其他形式能量的转换,在热力设备内部必须要有工作物质,如内燃机的燃气、汽轮机中的水蒸气、空调器中的氟里昂等,我们把实现热能和机械能相互转化的媒介物质称为工质。把工质从中吸取热能或接受工质排出热能的物质叫热源,温度较高的热源称为高温热源,温度较低的热源称为低温热源。广义上说,热源可以是恒温的,也可以是变温的。狭义上说,热源和物体是两个不同的概念。热源是具有无限大热容量的恒温系统,它对外放出或吸入有限的热量而不改变其自身的温度。而常见的“物体”是我们通常所说的热容量有限的变温系统,通常情况下它对外放热温度会下降,吸收热量温度会上升。

为分析问题方便,和力学中取分离体一样,热力学中常把分析的对象从周围物体中分割出来,研究它与周围物体之间的能量的传递。这种被人为分割出来作为热力学分析对象的有限物质叫做热力系统,简称热力系。周围物体统称外界。系统和外界之间的分界面叫做边界。边界是可以实际存在的,也可以是假想的。

按热力系与外界进行物质交换的情况,可将热力系统分类为:

闭口系统:热力系和外界无物质交换的系统,简称闭口系。闭口系是包含在封闭表面的一定量的物质,系统内的质量保持不变,又称控制质量。如图1-1所示。

开口系统:热力系和外界有物质交换的系统,简称开口系。这时,有物质流入或流出热力系,系统内的质量可以变化,但这种变化能够规划在一定的空间范围内,这时,我们的注意力集中到物质流入和流出空间的一个容积,这样的容积叫作控制容积,或称控制体,如图1-2所示。相应地,控制质量和控制容积与外界的分界面也可称为控制面。

按热力系与外界进行能量交换的情况,可将热力系分为:

绝热系统:热力系与外界无热量交换。

孤立系统:热力系与外界既无能量交换又无物质交换。

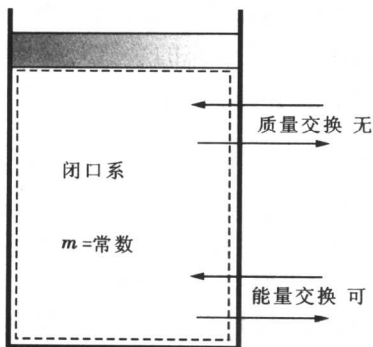


图 1-1 闭口系统

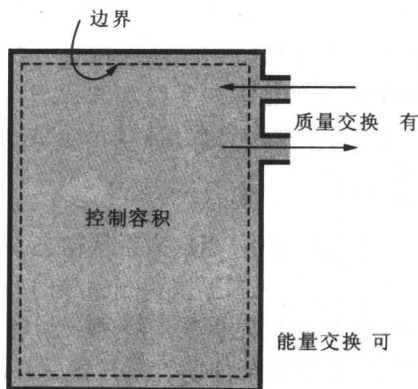


图 1-2 开口系统

在热力工程中,最常见的热力系是由可压缩流体(如水蒸气、空气、燃气等)构成的,这类可压缩系统与外界交换的功只有准静容积变化功(膨胀功或压缩功)一种形式,则该系统称为简单可压缩系统.工程热力学讨论的大部分系统都是简单可压缩系统.复杂热力系统是指系统与外界交换的功除容积变化功外,还有电功、磁功、表面张力功等广义功.

正确地选择热力系是正确的热力学分析的前提.没有明确选定热力系之前,对热、功、质量等任何问题的讨论都是不可能的.例如,我们可把由锅炉、汽轮机、冷凝器、给水泵等组成的整套火电厂蒸汽动力装置看作是一个热力系统,计算它在一段时间内从外界投入的煤耗量,向外界(发电机)输出的功,以及冷却水带走的热量等.这时水蒸气在热力系统内部循环往复流动,可以看成是质量不变的闭口系统.倘若只分析其中某个设备,如汽轮机或锅炉中的工作过程,它们不仅有吸热、做功等能量交换过程,而且有工质流入流出的物质交换过程.这时如果单独把汽轮机或锅炉作为划定的空间就组成开口系统.

1.2 热力系的宏观描述

1.2.1 状态参数

工质在热力设备中,会发生吸热、放热、压缩、膨胀等热力过程.我们把工质在某一瞬间所呈现的宏观物理状况称为工质的热力学状态,简称状态.工质的状态常用一些宏观物理量来描述.这种用来描述工质所处状态的宏观物理量称