

工程热力学简介 及例题

〔日〕饭沼一男 著

陶岚琴 译

国防工业出版社

3 0 7 4 0 8 0 2

TK123

22

工程热力学简介及例题

[日]饭沼一男 著

陶岚琴 译

11K29/13



C0005333

国防工业出版社

(京)新登字 106 号

内 容 简 介

本书依照课堂教学的特点,重点叙述了工程热力学课程的主要内容;结合大量典型例题,介绍了解题的思路和方法。书中列有大量练习题,并在书末附有较详细的解题步骤和答案。

本书是热能动力工程、汽轮机、锅炉等专业大学生极好的预、复习教材,并可作为高等学校有关专业师生的参考书。本书对于从事热能、动力专业的工程技术人员,也是一本有实用价值的参考资料。

工业热力学演习

饭沼一男 著

学献社 1978 年

*

工程热力学简介及例题

[日] 饭沼一男 著

陶岚琴 译

*

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092 1/32 印张 14 $\frac{3}{8}$ 326 千字

1991 年 12 月第一版 1991 年 12 月第一次印刷 印数: 0 001—2 300 册

ISBN 7-118-00652-1/O·55 定价:10.50 元

译者的话

本书作者饭沼一男先生是日本东京大学航空学科的教授,工学博士。该书按照课堂教学的特点,重点叙述了工程热力学课程的主要内容,语言流畅,条理清楚,重点突出,简明扼要。书中结合大量典型例题,讲解了解题的思路和方法。在每一部分内容之后,都列有大量与所述内容相结合的练习题,并在书末附有较详细的解题步骤和答案。

本书是热能动力工程、汽轮机、锅炉等专业的大学生极好的预、复习教材,并可作为高等学校有关专业教师的参考书。本书对于从事热能、动力专业的工程技术人员,也是一本有实用价值的参考资料。

由于译者水平所限,译文中肯定会有不妥之处,恳请读者批评指正。

序 言

包含能量转换并且涉及到热力的机械工程学方面的问题是非常多的。处理这些问题的主要科学,就是工程热力学。本书的意图是使读者理解这个分支里到目前为止所确立的基本原理,并培养他们正确处理实际问题的能力。本书是为大学二、三年级学生而写的入门书。首先是为听课的学生们作为预复习工具而写的习题集,当然也照顾到没有机会在大学里听课的人们的自学,或者为进行更高水平的学习作必要的基础知识的整理。

在写法上与课堂讲授相符合。首先大致说明基本概念,在这个基础上列举例题和题解。每隔适当的段落给出练习题,希望各位读者自己试着解答。书末附有全部习题的答案。但是为了熟悉解法、理解要点,必须要亲自试解大量典型的题目并努力积累。在参照答案时,希望充分注意这一点。

本书在比较少的篇幅里,集中了范围相当广泛的内容,以尽量简单明了作为宗旨。著者认为不太重要之处或者程度过高的内容,有时也省略了详细说明。有关传热和热机等内容,准备在这套书中分别作为独立的二本书出版。此外,考虑到实际使用时的方便,本书只刊载了有限的数字表和曲线图,希望与《机械工学便覧》之类的书一起使用。由于大部分数值计算都是使用 10 英寸计算尺做的,难免存在误差,敬请原谅。

编写时有很多打算,写完了一看,不足之处还很多,而且在没有考虑到的地方,说不定还存在错误。如能承蒙与内容的

不完备之处一并加以指教,将不胜荣幸。此外,执笔时参考了国内外各位先辈的著作;选择题目时,也多处借鉴于这些著作。在对所有这些作者表示衷心感谢的同时,还希望本书为有志于机械工程学的人们略微起到启蒙的作用。

著 者

1229/18

目 录

第一章 热力学第一定律和第二定律

1.1 基本概念	1
1.1.1 温度、热平衡	1
1.1.2 状态变化	2
1.1.3 热力学系统的能量	3
1.1.4 与热力学有关的量及其单位	3
练习题(1.1)	6
1.2 热力学第一定律	7
1.2.1 热力学第一定律	7
1.2.2 非流动系统的能量方程	8
1.2.3 流动系统的能量方程	11
1.2.4 特殊的状态变化	13
1.2.5 流动系统能量方程式的应用	16
练习题(1.2)	21
1.3 热力学第二定律	23
1.3.1 循环的效率	23
1.3.2 热力学第二定律	24
1.3.3 卡诺循环、绝对温度	25
1.3.4 熵	26
1.3.5 自由能和自由焓	28
1.3.6 热力学第三定律	31
练习题(1.3)	34

1.4 热力学的一般关系式	35
1.4.1 一般关系式	35
1.4.2 麦克斯韦关系式	36
1.4.3 比热的一般关系式	37
1.4.4 内能、焓及熵的一般关系式	38
练习题(1.4)	40
第二章 理想气体	42
2.1 理想气体的性质	42
2.1.1 理想气体的状态方程	42
2.1.2 理想气体的内能、焓及比热	43
2.1.3 理想气体的熵	45
练习题(2.1)	50
2.2 理想气体的状态变化	51
2.2.1 可逆变化	51
2.2.2 不可逆变化	57
练习题(2.2)	67
2.3 混合气体的性质	68
2.3.1 组元气体的分压力	68
2.3.2 混合气体的比重、分子量	69
2.3.3 混合气体的气体常数	69
2.3.4 混合气体的比热	70
2.3.5 混合气体的熵	71
2.4 半理想气体	71
2.4.1 半理想气体的性质	71
2.4.2 半理想气体的状态变化	73
2.4.3 气体表和气体图	74
练习题(2.3)	76

第三章 真实气体(蒸汽)	78
3.1 真实气体的性质	78
3.2 蒸汽的状态量	81
3.2.1 饱和液	82
3.2.2 干饱和蒸汽	83
3.2.3 湿饱和蒸汽	84
3.2.4 过热蒸汽	85
3.3 蒸汽的状态方程	86
3.4 蒸汽表及蒸汽图	88
练习题(3.1)	102
3.5 蒸汽的状态变化	104
3.5.1 等压变化	104
3.5.2 等容变化	104
3.5.3 等温变化	105
3.5.4 等熵变化	106
3.5.5 节流	107
3.5.6 干度恒定的变化	108
练习题(3.2)	109
3.6 湿空气	110
3.6.1 湿空气	110
3.6.2 湿度图	113
练习题(3.3)	114
第四章 气体的一元稳定流	116
4.1 基本概念	116
4.1.1 一元稳定流的基本方程	116
4.1.2 声速和马赫数	118
4.1.3 绝热流动和等熵流动	119

4.2 喷管内的流动	121
4.2.1 无摩擦喷管内的绝热流动	121
4.2.2 有摩擦的喷管内的流动	133
4.2.3 压力差小的喷管和测流孔的流动	138
练习题(4.1)	139
4.3 一元气体力学	141
4.3.1 一元气体力学的基本方程	141
4.3.2 等熵流动	147
4.3.3 有摩擦的绝热流动	150
4.3.4 有热交换的无摩擦流动	157
练习题(4.2)	163
第五章 燃烧	165
5.1 物质的平衡	165
5.1.1 化学反应式	165
5.1.2 必要的空气量	166
5.1.3 燃气的量和成份	167
练习题(5.1)	178
5.2 能量的平衡	180
5.2.1 燃料的发热量	180
5.2.2 燃气的温度	183
5.3 理想气体的反应	190
5.3.1 化学平衡	190
5.3.2 燃气的热离解	192
练习题(5.2)	197
第六章 热传递	199
6.1 热传递的形式	199
6.2 导热	204

6.2.1	导热方程	204
6.2.2	稳态导热	206
6.2.3	非稳态导热	208
	练习题(6.1)	217
6.3	对流	219
6.3.1	边界层方程式	219
6.3.2	层流传热	221
6.3.3	紊流传热	223
6.3.4	换热器	225
6.3.5	沸腾传热和凝结传热	227
	练习题(6.2)	233
6.4	辐射	234
6.4.1	辐射的基本定律	235
6.4.2	由辐射引起的热传递	238
	练习题(6.3)	241
第七章	压缩机的循环	243
7.1	回转式压缩机	243
7.2	往复式单级压缩机	248
7.3	往复式多级压缩机	252
	练习题(7.1)	256
第八章	理想气体的热机循环	258
8.1	内燃机的循环	258
8.1.1	理想的空气循环	258
8.1.2	实际的循环	265
	练习题(8.1)	269
8.2	燃气轮机的循环	270
8.2.1	理想的空气循环	270

8.2.2 实际的循环	275
练习题(8.2)	293
8.3 喷气式发动机的推动力和效率	295
8.3.1 冲压式空气喷气发动机	295
8.3.2 涡轮式喷气发动机	298
8.3.3 火箭	302
练习题(8.3)	303
第九章 蒸汽原动机的循环	305
9.1 理想循环	305
9.1.1 朗肯循环	305
9.1.2 回热循环	307
9.1.3 再热循环	309
9.1.4 再热回热循环	311
9.1.5 两种流体的循环	311
练习题(9.1)	315
9.2 实际循环	316
练习题(9.2)	317
第十章 制冷机、热泵的循环	320
10.1 基本概念	320
10.2 压缩式制冷机	321
10.2.1 空气制冷机	321
10.2.2 蒸汽压缩制冷机	321
10.2.3 真空制冷机	324
10.3 吸收式制冷机	328
练习题(10.1)	332
练习题解	335
常用计量单位换算表	462

第一章 热力学第一定律和第二定律

1.1 基本概念

1.1.1 温度、热平衡

温度是把通过感觉而得到的冷热程度加以客观表示的量。

使温度不同的两个物体接触,温度高的物体就不断降温,温度低的物体就不断升温,最终温度的差别就消失了。这时的两个物体处于热平衡。处于热平衡的两个物体,其温度相同,温度相同的两个物体处于热平衡。此外,如果某物体和另外两个各自处于热平衡的物体处于热平衡,则它们的温度相同。这称之为热力学第零定律,它是构成热力学和温度测量基础的重要概念。测定温度要利用由温度引起的物理性能的变化,例如物体的长度、体积、电阻等的变化;先确定在一定条件下可能重复出现的若干温度固定点,再通过应用第零定律来进行温度测定。因而温度依赖于使用的温度计。一般来说,除了固定点以外,由于温度计的种类不同,温度的标度是不同的。但是我们知道,象氢或氮那样的气体,在一定压力下,体积随温度的变化大体上是均匀的,而且从理论上说,能够确定与物质种类无关的热力学温度。

实际上,以冰点(在标准大气压的空气中,饱和的水和冰的平衡温度为 0°C 或 32°F)、沸点(在标准大气压下,水和水蒸

汽的平衡温度为 100°C 或 212°F) 等作为温度的固定点, 在给出温度计及其标度和温度的关系式以后确定了国际温标, 它被广泛采用着。以温度的最低极限 -273.16°C (-459.69°F) 作为起点所测定的温度称为绝对温度, 若用 T 表示绝对温度, 则

$$T(\text{K}) = t(^{\circ}\text{C}) + 273.16 \approx t(^{\circ}\text{C}) + 273$$

$$T(^{\circ}\text{R}) = t(^{\circ}\text{F}) + 459.69 \approx t(^{\circ}\text{F}) + 460$$

$$T(^{\circ}\text{R}) = \frac{9}{5}T(\text{K})$$

1.1.2 状态变化

以实际的或假想的边界与周围区别开的一部分空间或一定的质量称为系统。

当某个系统处于力学的及热的平衡时, 其状态就用热力学的坐标即温度、压力、比容等来表示。这些量之间存在着一定的关系, 这些关系通常是由物质决定的。这些热力学的坐标称为状态函数, 它们仅仅取决于平衡系统的状态, 而与达到这个状态的变化途径无关。若用数学方式表示, 状态函数是点函数, 它的微小变化可以用全微分表示。在状态函数之间成立的关系式称为状态方程, 一般来说, 状态方程不一定用最简单的式子来表示。

系统从某种状态转变成另一种状态的移动方式称为过程, 两个状态之间可能有各种各样的过程。状态发生变化时的每个瞬间都维持平衡, 这种情况下的变化是可逆的(反向进行就完全返回原始状态), 所以这样的过程称为可逆过程。完全可逆的过程是不能实现的, 但是如果在过程进行的每个阶段, 不平衡都非常小(称为准静态过程), 则往往可以看成是可逆

过程。当系统从某个状态出发连续进行变化,又返回原始状态时,这个过程就称为循环过程。

1.1.3 热力学系统的能量

热力学系统通过边界与外部进行能量交换时,输入或输出能量的形式是热或者功,能量交换后残留在系统内部的能量,除了有取决于外力的位能和动能以外,还有内能和流动能。有化学变化时,必须进一步考虑化学能,而发生核反应时,还必须考虑质量能。从微观来看,内能是分子动能和位能之和,而化学能是组成分子的原子之间的结合能。但是工程热力学通常不涉及这样的内容。

1.1.4 与热力学有关的量及其单位

工程热力学通常采用工程单位制(重力单位制)。

重量 G 或者力 F 在标准重力场中($g=9.80665\text{m/s}^2$ 〔米/秒²〕),把作用于 1kg^* (绝对单位制中的质量单位)物体的重力作为 1kg (千克)。在英美国家采用 1lb (磅)($=0.4536\text{kg}$)。通常不考虑地面上重力加速度数值的差异。

质量 m 根据牛顿运动定律,重量为 $G(\text{kg})$ 的物体,其质量为 $G/g(\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m})$ (千克·秒²/米)。英美国家采用所谓 $\text{lb} \cdot \text{s}^2/\text{ft}$ (磅·秒²/英尺) $\equiv \text{s/ug}$ (斯鲁格)的单位。重量是 32.174lb 的物体,其质量为 1slug 。

压力 p 压力是每单位面积的力。最常采用的单位是 kg/cm^2 ($=735.6\text{mmHg}$ 〔毫米汞柱〕 $=10.00\text{米水柱}=0.9678\text{atm}$ 〔标准大气压〕 $=0.9807\text{bar}$ 〔巴〕)。以真空作为基准的压力叫绝对压力,用 $\text{kg/cm}^2\text{abs}$ (绝对)表示(习惯上也把它写成 ata);以大气压作为基准的压力(即用布鲁东管压计等测

定的压力)叫做计示压力,用 $\text{kg/cm}^2\text{gauge}$ (压力计)表示(习惯上写成 atg 或 atü)。因而

$$(\text{绝对压力}) = (\text{计示压力}) + (\text{大气压})$$

计示压力为负值时,往往也用它的绝对值表示,如 100 mmHg 真空等。标准大气压是 $760\text{ mmHg} = 1.0332\text{ kg/cm}^2\text{ abs} = 1013.3\text{ mbar}$ (毫巴)。英美国常用 lb/in^2 (磅/英寸²) $\equiv \text{psi}$ 表示,绝对压力和计示压力往往分别 psia 、 psig 表示。 $1\text{ lb/in}^2 = 0.0703\text{ kg/cm}^2$, $1\text{ kg/cm}^2 = 14.22\text{ lb/in}^2$ 。

比重 γ 单位体积的重量。用 kg/m^3 或 lb/ft^3 (磅/英尺³, $=16.02\text{ kg/m}^3$) 表示。

比容 v 单位重量的体积,是比重的倒数。用 m^3/kg 或 ft^3/lb ($=0.0624\text{ m}^3/\text{kg}$) 表示。

密度 ρ 单位体积的质量, $\rho = \gamma/g$ 。因此,单位是 $\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$ 或 slug/ft^3 ($=52.59\text{ kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$)。

热量 Q 在标准大气压下,使 1 kg 水的温度升高 1°C 所需要的热量定为 1 kcal (千卡),但是温度不同,热量值会略有差别,因此严格地说,必须指定温度。在不指定温度时,也有时采用 1 国际 (IT) 千卡 $= 4186.05\text{ J}$ (焦耳)。使 1 lb 水的温度升高 1°F 所需要的热量叫 1 Btu (英制热量单位), $1\text{ Btu} = 0.252\text{ kcal}$ 。

热容量 C 使物体的温度升高 1°C 或 1°F 所需要的热量叫热容量,用 $\text{kcal}/^\circ\text{C}$ 或 $\text{Btu}/^\circ\text{F}$ 表示。

比热 c 1 kg (或 1 lb) 物质的热容量叫比热,用 $\text{kcal}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$ (或 $\text{Btu}/\text{lb} \cdot ^\circ\text{F}$) 表示。根据定义, $1\text{ Btu}/\text{lb} \cdot ^\circ\text{F} = 1\text{ kcal}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$ 。通常,由于物质的状态 (温度、压力等) 不同以及热输入输出时的过程 (状态变化) 不同,比热具有不同的数值。重要的是定压比热 c_p 和定容比热 c_v 。当比热仅仅是温度的函数时,使 $G(\text{kg})$ 物质的温度由 $t_1(^\circ\text{C})$ 上升到 $t_2(^\circ\text{C})$ 所需要的热量为

$$Q = G \int_{t_1}^{t_2} c dt = G c_m (t_2 - t_1)$$

$$c_m = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} c dt$$

c_m 是 $t_1 \sim t_2$ 温度之间的平均比热。1kmol(千摩尔)的热容量即为分子热(摩尔比热) $C = M c$ (kcal/kmol · °C)。这里的 M 是分子量(kg/kmol)。

粘滞系数 μ 由流体摩擦引起的切应力,在层流区与垂直流动方向的速度梯度成正比,这个比例常数就称为该流体的粘滞系数,用 $\text{kg} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ ($= 98.0665\text{P}$ ——泊, $\text{P} = \frac{\text{dyn} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}$ $\frac{\text{达因} \cdot \text{秒}}{\text{米}^2}$)或 $\text{lb} \cdot \text{s}/\text{ft}^2$ ($= 4.8824\text{kg} \cdot \text{s}/\text{m}^2$)表示。

动粘滞系数 ν $\mu/\rho = \nu$ 称为动粘滞系数,用 m^2/s 或 m^2/h ($\text{米}^2/\text{小时}$)、 ft^2/s ($= 0.0929\text{m}^2/\text{s}$)表示。

导热率 k 物体内部存在温度差时,通过单位截面积传导的热量和垂直该截面方向的温度梯度成正比,其比例常数就是这个物体的导热率,用 $\text{kcal}/\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ 或 $\text{Btu}/\text{ft} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F}$ (英制热量单位/英尺 · 小时 · 华氏度 $= 1.488\text{kcal}/\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$)表示。

功 W 力和与力同向位移的乘积,或者扭矩和角位移的乘积就是功,用 $\text{kg} \cdot \text{m}$ 或 $\text{ft} \cdot \text{lb}$ 表示。 $1\text{kg} \cdot \text{m} = 9.80665\text{J}$, $1\text{ft} \cdot \text{lb} = 0.1383\text{kg} \cdot \text{m}$ 。此外, $1\text{kcal} = 426.9\text{kg} \cdot \text{m}$,这个值叫做热功当量,用 J 表示,即 $J = 427\text{kg} \cdot \text{m}/\text{kcal}$ 。有时也采用 $A = 1/J$ (功热当量)。

功率 L 单位时间的功,即 $\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}$ 或 $\text{ft} \cdot \text{lb}/\text{s}$,但通常采用 kW (千瓦)或 PS (马力)。

$$1\text{kW} = 102\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s} = 737.6\text{ft} \cdot \text{lb}/\text{s}$$