



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

轮机工程基础

● 章学来 主 编
● 梅国梁 曹红奋 副主编
● 陈宝忠 主 审

Lunji
Gongcheng
Jichu



人民交通出版社

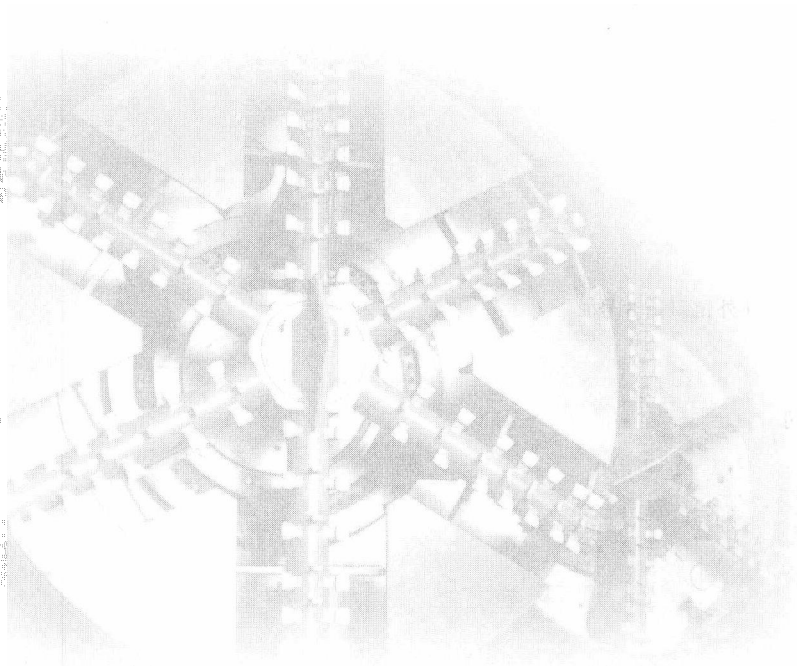
China Communications Press



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

轮机工程基础

● 章学来 主 编
● 梅国梁 曹红奋 副主编
● 陈宝忠 主 审



人民交通出版社

内 容 提 要

本章共分为十二章,分别为工程热力学、传热学、理论力学、机械振动、材料力学、流体力学、材料及其工艺、机构与机械传动、机械制图基础、机械制图、船用仪表和量具、单位及单位换算。

本书主要供海船轮机长、轮机员适任证书考证培训与进修及轮机工程专业学生学习之用,也可作为其他类型船舶轮机人员的培训教材、轮机工程专业及其他相关专业师生参考书。

图书在版编目 (C I P) 数据

轮机工程基础 / 章学来主编. —北京:人民交通出版社,
2009.9

ISBN 978 - 7 - 114 - 07921 - 4

I . 轮… II . 章… III . 轮机—技术培训—教材 IV .
U676.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 129850 号

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

书 名: 轮机工程基础

著 作 者: 章学来

责任编辑: 钱悦良

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757969, 59757973

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京凯通印刷厂

开 本: 787 × 1092 1/16

印 张: 30.25

字 数: 725 千

版 次: 2009 年 9 月 第 1 版

印 次: 2009 年 9 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978 - 7 - 114 - 07921 - 4

印 数: 0001 ~ 3000 册

定 价: 60.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)



本书根据国际海事组织关于对国际海员值班、培训、发证的 STCW 78/95 公约的有关规定及中华人民共和国海事局“海船轮机长、轮机员适任证书考试大纲”的要求编写。

本书是海船轮机长、轮机员适任证书培训教材之一,也是轮机工程专业的综合基础课教材,由于本课程涉及的内容广、理论性强、公式多,围绕着大纲的要求,本书做了比较系统的详细介绍。本书共分为十二章,分别为工程热力学、传热学、理论力学、机械振动、材料力学、流体力学、材料及其工艺、机构与机械传动、机械制图基础、机械制图、船用仪表和量具、单位及单位换算。

本书由上海海事大学章学来主编,梅国梁、曹红奋副主编,陈威、刘红敏、方清参编。其中,第一、四、七章及第五章 5~8 节由章学来编写,第二章由曹红奋编写,第三章由方清编写,第五章 1~4 节及第十一章、第十二章由陈威编写,第六章由刘红敏编写,第八~十章由梅国梁编写。全书由章学来主编定稿。

全书承上海海事大学陈宝忠教授主审。

本书主要供海船轮机长、轮机员适任证书考证培训与进修及轮机工程专业学生学习之用,也可作为其他类型船舶轮机人员的培训教材,轮机工程专业及其他相关专业师生参考书。由于编者缺乏经验,水平有限,书中错误与不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2009 年 5 月



第一章 工程热力学	1
第一节 基本概念.....	1
第二节 热力学第一定律.....	8
第三节 热力学第二定律.....	17
第四节 理想气体.....	21
第五节 水蒸气.....	39
第六节 气体和蒸汽的流动.....	45
第七节 压缩机的热力过程.....	51
第八节 气体动力循环.....	60
第九节 制冷循环.....	68
第十节 湿空气.....	72
第二章 传热学	81
第一节 导热.....	81
第二节 对流传热.....	89
第三节 辐射传热.....	101
第四节 传热过程.....	111
第五节 换热器.....	118
第三章 理论力学	124
第一节 力学基础.....	124
第二节 刚体系统的平衡、摩擦.....	129
第三节 刚体的基本运动.....	143
第四章 机械振动	148
第一节 机械振动及其分类.....	148
第二节 自由振动.....	149
第三节 有阻尼的受迫振动.....	150
第四节 振动的利用及消除方法.....	151
第五章 材料力学	153
第一节 材料力学的基本概念.....	153
第二节 轴向拉伸与压缩.....	157
第三节 剪切与挤压.....	168
第四节 扭转.....	172

第五节	弯曲	181
第六节	应力集中	193
第七节	薄壁容器的强度计算	194
第八节	构件的疲劳损坏及预防	196
第六章	流体力学	198
第一节	流体的主要物理性质	198
第二节	流体静力学基本方程及其应用	207
第三节	流体运动学基础	212
第四节	流体流动的两种形态	216
第五节	流动阻力和水头损失	218
第六节	伯努里方程及其应用	220
第七章	材料及其工艺	227
第一节	金属材料的性能	227
第二节	钢的热处理	234
第三节	金属材料的冷加工工艺	273
第四节	常用材料	282
第五节	轮机主要零件的材料	319
第六节	船体结构和设备的材料	326
第八章	机构与机械传动	329
第一节	平面连杆机构	329
第二节	凸轮机构	339
第三节	间歇运动机构	342
第四节	摩擦轮传动	344
第五节	皮带传动	348
第六节	链传动	353
第七节	齿轮传动	355
第八节	蜗轮蜗杆传动	365
第九节	液力传动	367
第九章	机械制图基础	372
第一节	机械制图基本知识	372
第二节	机件的表达方法	401
第十章	机械制图	408
第一节	常用件和标准件	408
第二节	零件图和装配图	417
第十一章	船用仪表和量具	436
第一节	船用仪表	436
第二节	量具	446
第十二章	单位及单位换算	451
第一节	国际单位制	451
第二节	法定计量单位	452

第三节 单位换算.....	455
附录.....	460
附录一 新旧名称对照表.....	460
附录二 工质的热力性质.....	461
附录三 轮机长、轮机员适任证书《轮机工程基础》考试大纲	464
参考文献.....	476



第一章 工程热力学

热力学是研究热能与其他形式能量相互转换规律的科学。工程热力学是热力学的一个分支,它研究热能与机械能相互转换的基本规律,并寻求提高热能利用经济性的有效途径和方法。

在船舶轮机工程中,许多热力设备如内燃机、燃气轮机、压气机、制冷装置等都涉及热能与机械能的相互转换。因此,工程热力学是轮机工程的重要技术基础。热力学有两种研究方法:一种是宏观研究方法,另一种是微观研究方法。工程热力学主要应用宏观研究方法,其特点是:通过大量现象总结规律,并将其普遍规律结合不同的特殊条件,推论出适应这些条件的特殊规律。由于宏观研究方法只依据经验定律和数学推导,没有作任何人为的假设,因而其得出的结论和计算公式十分可靠,可以很好地指导实践。工程热力学主要包括三方面的内容:①能量转换的客观规律,即热力学基本定律;②工质的热力性质;③各种热力装置的工作过程,将热力学定律应用于工程实践。对不同过程和循环进行分析计算,探讨影响能量转换效果的因素及提高转换效率的途径。

第一节 基本概念

在讨论热力学基本定律之前,先引入一些热力学基本概念,如工质、热力学系统、平衡态、状态参数、准静态过程和可逆过程等。正确理解和掌握这些概念,对学会热力学分析方法并以此解决能量转换实际问题非常重要。

一、工质

工质是指在热力设备中实现热能与机械能相互转换的媒介物质。例如燃气是内燃机的工质,水和水蒸气是蒸气动力装置的工质,制冷剂(R12、R22、R134a等)是蒸气压缩制冷装置的工质。热力学所研究的工质一般为气态物质,如空气、燃气和蒸气等。作为工质的物质必须具有良好的膨胀性和流动性。

二、热力系统

在力学中,为了分析一个物体的受力情况,常将其作为隔离体,然后再来分析被隔离开的其他物体对其的作用力。同样,对于各类热力设备进行热力学分析时,也常采用类似的方法,即将分析对象从周围物体中隔离开来,这种人为分割出来的热力学研究对象称为热力学系统,简称热力系统或系统。系统外的物体统称外界,系统与外界的分界面称为边界,边界在图上习惯用虚线表示。系统的边界可以是真实的,也可以是假想的;可以是固定的,也可以有位移或变形。如图 1-1a)所示,取内燃机气缸

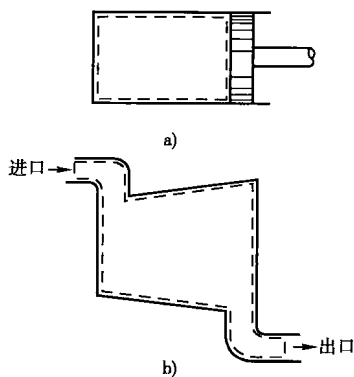


图 1-1



中的工质作为系统,边界为气缸壁面与活塞顶部,显然,该边界是真实的,但又随着活塞移动而不断改变位置。又如图 1-1b)所示,取燃气轮机缸体空间为系统,边界为气缸壁面与进出口界面,显然,该边界一部分是真实的,另一部分则是假想的。

系统与外界有三种相互作用,即:物质交换、功的交换和热的交换。所以热力学系统与外界的相互作用,较之力学中的隔离体与外界单纯力的相互作用,要远为复杂。

在热力学分析中,常把系统分为以下几类:

(一) 闭口系统

与外界没有物质交换的系统,又称封闭系统。在闭口系统中,其质量保持恒定不变,称为“控制质量”。内燃机的气缸可取作闭口系统,这时内燃机气缸进、排气阀都关闭,在考察内燃机内部进行热力过程时,其内部质量近似不变,因此将其看作闭口系统是合理的。

(二) 开口系统

与外界有物质交换的系统。在开口系统中,质量可以发生变化,而将所研究的热力系统限制在一定的空间范围内。该空间范围称为是“控制容积”。如图 1-1b)所示的燃气轮机气缸,有工质的流进和流出,即为开口系统。同样,开口系统与外界可以有热和功的交换,也可以没有。

(三) 绝热系统

与外界无任何热交换的系统,可以想象为系统的边界完全由隔热材料所构成,任何瞬间与边界上都没有热交换。事实上,自然界并不存在绝对的隔热。但是如果考虑系统与外界所相互传递热量甚小及至忽略不计,则可将该系统看成绝热系统。在热力工程上,如内燃机、汽轮机、喷管等都可当作绝热系统来加以分析。

(四) 孤立系统

与外界既无物质交换又无能量交换的系统。孤立系统是假想的,它与外界不发生任何相互作用,物质与能量的交换只可能发生在系统内部。闭口系统若与外界没有热和功的交换即为孤立系统。利用孤立系统的概念,可以有效地简化某些热力学分析。

除此之外,在热力学分析时,还引入其他一些系统的概念。对于热容量无限大的系统,其放出热量和吸热都不改变自身温度。对于这种放出热量的系统,称它为恒温高温热源,或简称高温热源或热源。对于那种接受热量的系统,称为恒温低温热源,或简称低温热源或冷源。在实际动力机中,如内燃机、蒸汽动力装置等,将热能转换为机械能都是通过具体媒介物质(如蒸汽或燃气等)来实现的。内燃机的工质通过燃烧吸收热量,而蒸汽动力装置的工质,通过向锅炉的炉膛内燃烧形成的高温燃气吸收热量。为了分析方便,将简化抽象为内燃机或蒸汽动力装置内的工质从某一热源吸热来取得能量,同样,向外界放热可以抽象为向某一冷源放出热量。

三、热力学平衡态

在热力设备中,热能与机械能的相互转换都是借助于工质的一系列宏观物理性质的变化来实现的。这种工质在某瞬间所表现出来的宏观物理状况,称为热力学状态,简称状态。而描述工质所处状态的特性物理量,则称为状态参数。



热力系统可能呈现各种不同的状态,其中具有特别重要意义的是所谓的热力学平衡态,简称平衡态,它是指在没有外界影响的条件下,热力系统总是保持不变的状态。热平衡、力平衡、化学平衡是热力系统建立平衡态的必要条件。所谓热平衡,是指系统各部分工质之间没有热量传递;所谓力平衡,是指系统各部分之间没有相对位移;所谓化学平衡则是指系统各部分之间不发生化学反应。

不考虑化学反应,处于平衡态的热力系统,只要不受外界影响,它的状态就不会随时间改变,平衡也不会自发地被破坏;处于非平衡态的热力系统,则由于各部分之间的传热和位移,其状态将随时间而改变,结果必定逐渐减弱传热和位移,直至完全停止,即非平衡态系统在没有外界影响的条件下,总会自发地趋于平衡态。如有一钢棒,一端被热源加热,经过相当长一段时间后,钢棒各点的参数不随时间发生变化,取钢棒为热力学系统,虽然钢棒各点的参数不随时间变化,但由于存在外界影响(热源加热),系统内外有温差存在,因此该系统不是平衡态,而是稳态。

此外,平衡和均匀也是两个不同的概念。平衡是相对时间而言的,而均匀是相对于空间而言的。因此平衡态不一定是均匀态。例如,处在平衡态的水和水蒸气系统,由于汽、液两相密度相差极大,故不是均匀的。然而一个单相系统,尤其是气相系统,如果忽略重力场对压力分布的影响,则可认为平衡态就是均匀态。

平衡态不仅具有确定的状态参数,而且由于抛开了时间概念,从而大大简化了状态的描述,这正是工程热力学提出平衡态的原因之所在。因此,工程热力学分析中的所有状态参数都是平衡态的状态参数,平衡态是工程热力学研究的重要理论基础之一。

四、热力状态参数

由上述可知,状态参数是描述热力系统平衡态特性的具体物理量,因此,要研究热功转换的基本规律,首先必须研究状态参数及其变化规律。状态参数具有下列基本特性:状态参数与状态一一对应。每一状态都有唯一确定的状态参数,只要其中一个状态参数改变,工质的状态就随之而变;状态参数的数值由系统状态唯一确定,是状态的单值函数或点函数,当系统状态变化时,状态参数的变化量只与初、终状态有关,而与变化的途径无关。

如以 x 表示任一状态参数,当热力系统从初态 1 变为终态 2 时,其变化量为

$$\int_1^2 dx = x_2 - x_1 \quad (1-1)$$

当热力系统经历一封闭过程又回到原始状态时,其状态参数的变化量为 0,即

$$\oint dx = 0 \quad (1-2)$$

另外,几个状态参数经过有限次加、减、乘、除等运算后所得的参数,仍然是状态参数。热力学中常见的状态参数有:温度(T)、压力(p)、比体积(v)、比热力学能(u)、比焓(h)、比熵(s)等,其中温度、压力、比体积可以直接或间接用仪表测量出来,称为基本状态参数。

系统的状态参数依其特性还可分为两类:尺度量和强度量。尺度量是描述系统总体特性的状态参数,如系统的体积、内能、焓、熵等,其数值为系统中各部分的数值的总和,具有可加性。对于均匀系统,尺度量的数值与系统的质量成正比。强度量是描述系统内各点特征的状态参数,如系统的压力、温度等,其数值与系统的质量无关,具有不可加性。



下面将对常见的状态参数分别进行探讨:

(一) 温度

1. 定义

描述物体冷热程度的物理量称为温度。物体越冷,温度越低;反之,物体越热,温度越高。从宏观角度来看,温度是一个描述热力系统热平衡特性的状态参数。热力学第零定律指出,“无论多少个物体互相接触,都能达到热平衡”。它表明,达到热平衡的所有物体必定具有一个共同的宏观特性,表征这个宏观特性的物理量就是温度,即一切处于热平衡的物体必具有相同的温度。从微观角度来看,温度是物体内部分子、原子等微观粒子不规则热运动强度的量度。微观粒子热运动越剧烈,物体的温度就越高。

2. 温标

温度的数值表示方法称为温度标尺,简称温标。它是表示温度高低的尺度。常用的温标有以下三种:

(1) 摄氏温标。规定在标准大气压下,纯水的冰点为 0 度,沸点为 100 度,其间 100 等分,每等分为摄氏 1 度,记作 1°C ;摄氏温标用符号 $t^{\circ}\text{C}$ 表示。

(2) 华氏温标。规定在标准大气压下,纯水的冰点为 32 度,沸点为 212 度,其间 180 等分,每等分为华氏 1 度,记作 1°F ;华氏温标用符号 $t^{\circ}\text{F}$ 表示。

(3) 热力学温标。又称绝对温标,它以纯水的三相点温度(即固、液、汽三相平衡态的温度)为基本点,定义为 273.16 度,每度的间隔与摄氏温标相同,1 度记作 1K;热力学温标用符号 TK 表示。

摄氏温标和华氏温标的标定都依赖于测温物质的物理特性,温度数值与测温物质有关,称为经验温标;而热力学温标则与测温物质的物理特性无关,是国际上规定的最基本温标。

公制系统采用摄氏温标,英制系统采用华氏温标。

摄氏温度与华氏温度的换算关系为

$$t^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5}t^{\circ}\text{C} + 32^{\circ} \quad (1-3)$$

摄氏温度与开氏温度的换算关系为

$$TK = t^{\circ}\text{C} + 273.15 \quad (1-4)$$

在工程上采用下式计算已足够准确

$$TK = t^{\circ}\text{C} + 273 \quad (1-5)$$

例 1-1 已知摄氏温度为 40°C ,对应的华氏温度为多少? 又知华氏温度为 68°F ,对应的摄氏温度为多少? 再如摄氏温度是 -40°C ,则相当于多少华氏温度?

解 摄氏温度为 40°C 时,华氏温度为

$$t^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5} \times 40 + 32 = 104^{\circ}\text{F}$$

华氏温度为 68°F 时,对应的摄氏温度为

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9} \times (68 - 32) = 20^{\circ}\text{C}$$

又当摄氏温度是 -40°C 时,华氏温度



$$t^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5} \times (-40) + 32 = -40^{\circ}\text{F}$$

(二) 压力

1. 定义

热力系统内单位面积所受到的工质垂直作用力称为压力(又称压强),用符号 p 表示,即

$$p = \frac{F}{A} \quad (1-6)$$

式中: F ——工质作用于表面积 A 的垂直作用力, N;

A ——边界总面积, m^2 。

从分子运动论观点来看,气体压力是大量气体分子无规则热运动对容器壁面的平均撞击力,数值与单位体积内的分子数和分子的平均移动动能成正比。平衡态时热力系统中各处压力均匀一致。

2. 单位

根据力 F 和面积 A 选用单位的不同,压力的单位可分为三类:

(1) 国际制单位:帕斯卡(Pa), $1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$ 。工程上因帕斯卡单位数值太小而常用巴(bar)和兆帕(MPa), $1\text{bar} = 10^5\text{Pa}$, $1\text{MPa} = 10^6\text{Pa}$ 。

(2) 英制单位:磅力/平方英寸(bf/in²)或英寸汞柱(inHg)。

(3) 公制单位:工程大气压(at)、毫米汞柱(mmHg)、米水柱(mH₂O)、标准大气压(atm)。

三类单位之间的换算归纳如下:

$$1\text{atm} = 760\text{mmHg} = 10.33\text{mH}_2\text{O} = 1.01325\text{bar} = 1.01325 \times 10^5\text{Pa} = 1.033\text{at}$$

$$1\text{at} = 1\text{kgf}/\text{cm}^2 = 735.6\text{mmHg} = 10\text{mH}_2\text{O} = 0.981\text{bar} = 9.81 \times 10^4\text{Pa} = 14.22\text{bf}/\text{in}^2 = 29\text{inHg}$$

3. 大气压力(p_b)

大气压力是由地面上几百公里厚的空气层的重量所造成的,大小随纬度、高度和气候等条件而有些变化,可用气压表测定。通常所说的大气压均指当时当地大气压。在物理学中,把纬度 45°海平面上常年平均气压定义为标准大气压(atm)。

4. 表压力、真空度及绝对压力

工质的压力可用压力表测定,由于工程上测压仪表本身常处于大气压力作用下,因此表上所指示的压力并非被测系统的真实压力,而是系统压力与当时当地大气压力的某种差值。绝对压力是指系统的真实压力,用符号 p 表示;表压力是指系统压力高于大气压力时,压力表的读数,用符号 p_g 表示;真空度则是指系统压力低于大气压力时,真空压力表的读数,用符号 p_v 表示。下面以 U 形管压力计测量风机吸入管与排出管的空气压力为例来说明绝对压力、表压力、真空度及大气压力之间的关系,如图 1-2 所示。

显然,在风机入口处有

$$p + p_v = p_b \quad (1-7a)$$

$$p_v = p_b - p \quad (1-7b)$$

即真空度等于大气压力减去绝对压力。在风机出口处有

$$p = p_b + p_g \quad (1-8a)$$

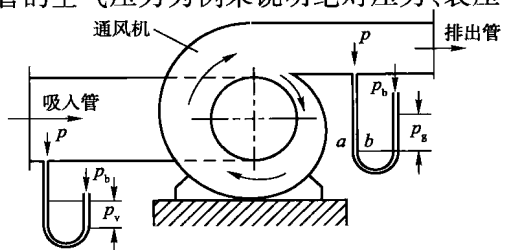


图 1-2



$$p_g = p - p_b \quad (1-8b)$$

即表压力等于绝对压力减去大气压力。图 1-3 绘出了上述关系示意图。

表压力和真空度都是以当地大气压力为基准的相对压力，表压力表示比大气压高的压力差值，真空度表示比大气压低的压力差值。由于大气压力随时随地可能发生变化，因而会影响到表压力或真空度，所以在工程计算上以绝对压力作为计算的依据。

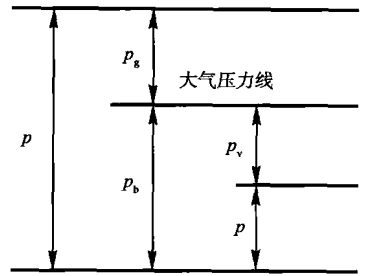


图 1-3

例 1-2 锅炉中蒸汽压力根据压力表读数 $p_g = 3.23\text{MPa}$ ，凝汽器的真空度根据真空表读数 $p_v = 710\text{mmHg}$ ，若大气压力 $p_b = 760\text{mmHg}$ ，试求锅炉中蒸汽的绝对压力和凝汽器中蒸气的绝对压力。

解 锅炉中水蒸气的绝对压力为

$$p = p_b + p_g = 760 \times 1.333 \times 10^{-3} + 3.23 \times 10 = 33.313\text{bar} = 3.3313\text{MPa}$$

在计算高压容器的绝对压力时，如未给出大气压力数据，这时可将大气压力当作 1bar 计算，其相对误差很小，如

$$p = p_b + p_g = 1 + 32.3 = 33.3\text{bar} = 3.33\text{MPa}$$

当在计算低压容器中的压力时就不能如此处理，如凝汽器中绝对压力为

$$\begin{aligned} p &= p_b - p_v = (760 - 710) \times 1.333 \times 10^{-3} \\ &= 0.0666\text{bar} \end{aligned}$$

如果将大气压力作为 1bar，那么

$$p = 1 - 710 \times 1.333 \times 10^{-3} = 0.0536\text{bar}$$

$$\text{相对误差} = \frac{0.0666 - 0.0536}{0.0666} \times 100\% = 19.5\%$$

由此可见，当大气压力偏离 1bar 较大时，在低压计算中，不宜用 1bar 代替当地大气压力。

(三) 比体积(质量体积)

单位质量工质所占的体积称为比体积，用符号 v 表示，单位为 m^3/kg 。其定义式为

$$v = \frac{V}{m} \quad (1-9)$$

式中： m ——系统内工质质量，kg；

V ——系统所占体积， m^3 。

单位体积工质所具有的质量称为密度，用符号表示，单位为 kg/m^3 。仍然用 m 表示工质质量，用 V 表示工质体积，则有

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-10)$$

显然，比体积和密度互为倒数，即

$$\rho v = 1 \quad \text{或} \quad \rho = \frac{1}{v}$$

对于一定的气体工质而言，比体积、密度均为描绘分子聚集疏密程度的物理量，比体积越



大、密度越小,表明气体越稀疏。

五、准静态过程和可逆过程

(一) 准静态过程

热力学中,把系统从初始平衡态到终了平衡态的状态连续变化过程,称为热力过程,简称过程。热能和机械能的相互转换必须通过一定的热力过程才能完成。状态变化意味着旧平衡态的破坏,新平衡态的建立。通常,从旧平衡态破坏到新平衡态建立所需时间称为弛豫时间。如果过程进行的时间远大于弛豫时间,中间非平衡态就能很快恢复新的平衡,二平衡态之间的非平衡态将极为短暂,以致系统所经历的每一中间状态都足够接近平衡态,这样的过程称为准静态过程,又称准平衡过程。下面用例子加以说明。

设有一如图 1-4 所示的气缸,其活塞杆上有一端盘,内置三块砝码,气缸与活塞形成闭口系统。当缸内气体压力 p_1 与三块砝码与大气压力所产生外压力 $p_{\text{ext}1}$ 相等时,活塞静止于位置 1,缸内气体处于平衡状态,缸内各处状态参数相等,等于 p_1, v_1, \dots 。在 $p-v$ 图上,点 1 (p_1, v_1) 代表了气缸内工质初态 1。如拿掉砝码 1,该时气缸压力 p_1 大于两块砝码重量与大气压所产生之外压力 $p_{\text{ext}2}$ 。缸内气体膨胀,活塞上移,在接近活塞处气体压力减小,比体积增大,各处压力和比体积都随时间与位置而改变,原来的平衡态 1 被破坏,与此同时,气体内部分子的运动、压力波的传播使内部的不均匀性消失,使活塞到达位置 2。这时缸内气体压力为 p_2 ,比体积为 v_2 。缸内与外界压力相等, $p_2 = p_{\text{ext}2}$,气体达到新平衡态 2,在 $p-v$ 图上以点 2 表示。现再拿掉砝码 2,缸内气体重演上述过程,平衡态 2 被破坏,经不平衡态,至平衡态 3,即 $p_3 = p_{\text{ext}3}$,活塞到达位置 3,在 $p-v$ 图用点 3 表示。综上所述,由平衡态 1 至平衡态 3 的状态变化过程,除状态 1、2、3 是平衡态外,其中间状态都是非平衡态。

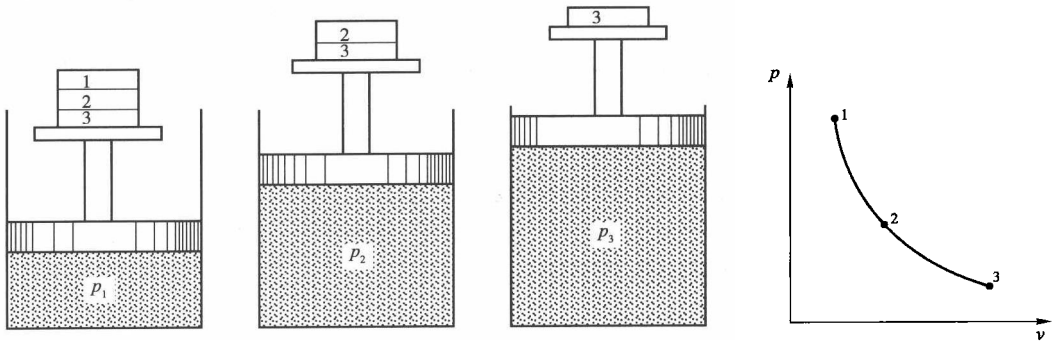


图 1-4

设想上述端盘放置不是砝码,而是一堆与砝码重量相同的沙子,在状态变化过程中每次只移去一粒沙子,则其所造成的热力系内部的不平衡性小到可以忽略,系统经历的中间状态更接近平衡态。由此可见,压差作用下的气体膨胀过程为准静态过程的条件是:系统与外界的压力无限小。同理,温差作用下的气体膨胀过程为准静态过程的条件则是:系统与外界的温差无限小。因此,准静态过程的基本特征是:系统与外界的压力和温差均为无限小。由于准静态过程全部由平衡状态组成,处于平衡状态的系统具有单一的状态参数,因此,在状态坐标图上准静态过程可用一条连续曲线表示,这样就便于热力学分析计算。实际热力设备中,都是有限温差



与压差作用下的不平衡过程。但由于许多实际过程进行的时间远比弛豫时间大,其非平衡态的出现短暂,可看作准静态过程加以分析。如内燃机的膨胀或压缩过程,活塞运动的平均速度一般不超过 10m/s ,而压力波(使压力趋向平衡)传播速度却为音速(一般达到每秒几百米),因此,缸内出现的不平衡态可很快消除,使整个过程接近准平衡过程。

(二) 可逆过程

系统完成某一过程,如有可能沿同一路径逆行回复到初态,且系统和外界同时恢复原状而不遗留任何变化,这样的过程称为可逆过程。注意,不能把可逆过程仅仅理解为能使系统逆行进行回到初态的过程。因为任何过程都可逆向进行,使系统回到初态,只有那些逆向进行时,系统和外界同时恢复原状的过程才是可逆过程,否则,就是不可逆过程。

如图 1-5 所示,取内燃机气缸内工质为闭口系统,外界有热源 T 。由于该气体膨胀过程是准平衡过程,系统内部及其与外界必须保持力与热的平衡,即气体对外界作用力与外界的反抗力总是相等,热源与气体的温度也时刻相等,或相差无限小。此外,过程中不存在任何能量耗散,如摩擦、固体非弹性变形、电阻磁滞等。

缸内气体由热源等温吸热 ΔQ ,膨胀做功 ΔW ,该 ΔW 功储藏于旋转的飞轮中。在该过程中,气体准平衡膨胀,由状态 1 至状态 2,经 a, b, c, d, e, f 等无数平衡态,在 $p-v$ 图上可用状态线 $1abcdf2$ 表示。

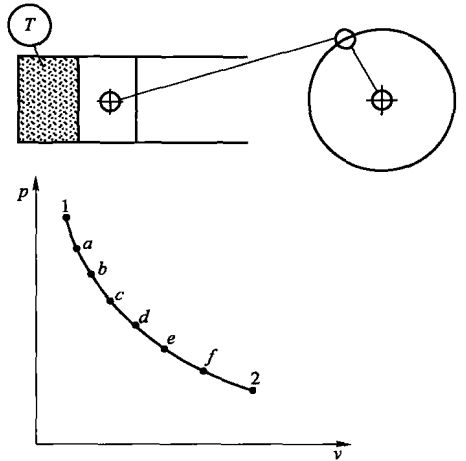


图 1-5

利用飞轮的惯性,储于飞轮的 ΔW 功,使活塞逆向压缩气体,该过程是准平衡气体压缩过程,同时向热源等温排出 ΔQ 热量,缸内气体仍循原状态变化返回初态 1,在 $p-v$ 图上即逆向沿原径回到 1 点,系统内的工质以及外界中所涉及系统的一切,如热源、飞轮等都回复到初态,而不发生任何变化,该过程 1-2 就称为是可逆过程。

可见,可逆过程的基本特征是:一是准平衡过程;二是没有任何耗散效应(在热力学中主要指摩擦)。摩擦、压差、温差是造成不可逆的因素。

总之,可逆过程是没有热力学损失的过程,可以想象,但不可能实现,是一个理想的极限过程,但它在热力学理论及实践上都具有重要意义。

(三) 准静态过程与可逆过程的关系

由上述讨论可知,可逆过程必定是准静态过程,而准静态过程不一定是可逆过程。准静态过程是一个内部平衡的过程,不涉及因耗散效应所导致外界可能的能量损失,而可逆过程则是一个内部、外部同时平衡的过程。只有无摩擦的准静态过程才是可逆过程。

第二节 热力学第一定律

热力学第一定律是能量转换与守恒定律在热力学上的应用。在对热能与机械能相互转换的研究中,它奠定了对该转换进行定量分析的基础。



一、热力学第一定律的内容及实质

热力学第一定律是在实践中人类经过长期经验积累所作的总结,它是能量守恒与转换定律在热现象上的应用。

能量守恒及转换定律表明:自然界中的一切物质都具有能量;能量有各种不同形式,并能从一种形式转换为另一种形式;在转换中,能量的总数保持不变。该定律被无数的事实所证实,并适用于力的、热的、化学的、电磁的、原子及核子内部的以及生物现象。

热能与机械能的相互转换作为能量守恒及转换定律的应用特例,由热力学第一定律所表示,即“机械能可以变为热能,热能也可以变为机械能,在转换中,能量总数不变”。如果把进行热能与机械能互转换的热力系统,与外界环境合在一起看作孤立系统,该定律可以表述为“在孤立系统内,能量的总量保持不变”。对于任意热力学系统,热力学第一定律可表示为

$$\text{输入系统的能量} - \text{输出系统的能量} = \text{系统中储存能量的增加}$$

根据上式,可将能量分为两大类,即传递中的能量和系统中的储存能量。传递中的能量,即通过系统边界传递的能量有两种:功和热量,它们不是状态参数,而是过程参数。系统的储存能量,从宏观来看,当系统的状态一定时就有一个确定的数值,因而是一个状态参数。在工程热力学中,为讨论方便,将储存能量分为两类:一类以系统相对于其外部参考系的参数(外部参数)来描述的能量,如系统的宏观动能 E_k 和宏观位能 E_p ;另一类是以系统内部的状态参数来描述的能量,即在本节即将介绍的热力学能,它是系统内工质的分子运动和其他微观运动模式所确定的能量。

在历史上,曾经有不少人企图创造出一种不耗费任何能量而不断作功的机器,该机器称为第一类永动机。显然,第一类永动机是违反热力学第一定律的,历史上无数实践经验也证实了第一类永动机是造不出来的,故热力学第一定律又可表述为“第一类永动机是造不成的”。

二、热量和功

为了写出热力学第一定律的数学表达式,有必要介绍功和热的概念。

(一) 功

功是系统与外界传递能量的一种方式,力学中定义为受作用的物体产生宏观位移所传递的机械能,该功等于作用力及沿力的方向所产生位移的乘积。若在力 F 作用下,物体同方向发生微小位移 dx ,则力 F 所作的微功为

$$\delta W = F dx \quad (1-11)$$

当该物体在力 F 作用下,由空间某点 1 沿力 F 方向移动到点 2,则所作的总功为

$$W_{1-2} = \int_1^2 F dx \quad (1-12)$$

热力系统以作功方式与外界交换能量可以有二种:对于闭口系统为体积功;对于开口系统,则为技术功。

1. 体积功

在工程上,热与功的相互转换常常是通过气体的体积变化来实现,所以体积功具有特别重要的意义。



如图 1-6 所示,气缸里有 $m\text{kg}$ 工质,以其为所研究的闭口系统,当工质从初态 1 沿可逆过程 1-2 膨胀到终态 2 时,系统对外界作膨胀功,传递能量给外界,由于该过程为可逆过程,工质压力与外界压力随时相等。当活塞移动一微小距离 dx ,工质反抗外力所作膨胀功为

$$\delta W = Fdx = pAdx = pdV \quad (1-13)$$

式中: A ——活塞面积;

dV ——工质体积变化量。

当工质从状态 1 膨胀到状态 2,所作膨胀功为

$$W_{1-2} = \int_1^2 pdV = \text{面积 } 12ba1 \quad (1-14)$$

若活塞反向,由状态 2 至状态 1,进行可逆压缩,则可得其压缩功为

$$W_{2-1} = \int_2^1 pdV = - \text{面积 } 12ba1 \quad (1-15)$$

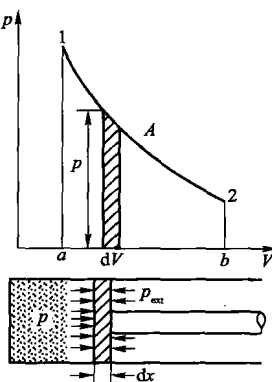


图 1-6

式(1-15)负号表示压缩功,是由外界对工质所作的功,若已知 $p = f(v)$ 的函数关系,即可求出膨胀功或压缩功。由功的计算式可看出体积功仅与气体体积变化量有关,即仅当界面所包围的气体体积发生变化,产生可逆膨胀与压缩时,即可按上式进行功的计算。

2. 技术功

开口系统和外界交换能量所作的总功称为技术功。

在考察技术功前,先介绍一下流动功,即当工质在开口系统中流动而传递的功。

如图 1-7 所示,以燃气轮机为例,该机作为一开口系统,虚线为其控制体积界面,流动工质要进入控制界面,必须推挤其前方流体,以腾出空间使其前进,这时流体就要对界面内的流体作功,即为流动功。

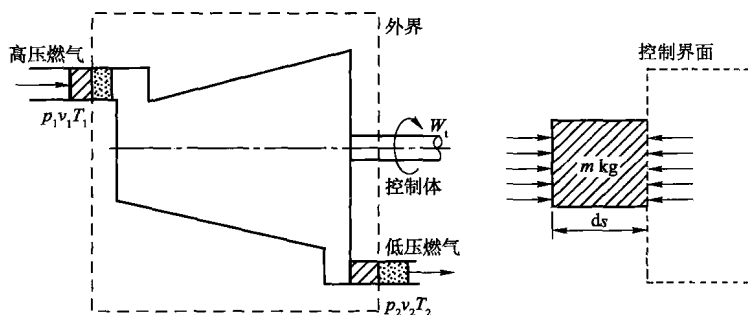


图 1-7

设在控制体界面处流动的状态参数为压力 p_1 、比体积 v_1 ,管道截面为 A ,其推挤前方工质 $m\text{kg}$ 前进 ΔS_1 距离,所作流动功为

$$W_{fl} = p_1 \cdot A \cdot \Delta S_1 = p_1 V_1 = mp_1 v_1$$

1kg 工质的比流动功为

$$w_{fl} = p_1 v_1 \quad (1-16)$$

同样,燃气轮机系统流出的工质要推挤界面外工质,就要对界面外工质作流动功,该流动功为