



21世纪

高等学校精品规划教材

工程热力学

鄂加强 杨蹈宇 崔洪江 唐文武 编著
王汉青 主审



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

21世纪

高等学校精品规划教材

工程热力学

鄂加强 杨蹈宇 崔洪江 唐文武 编著
王汉青 主审



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

工程热力学是研究物质的热力性质、热能与其他能量之间相互转换的一门工程基础理论学科。本教材以基础知识、基本理论以及工程应用为主线,重点阐述了热力学基本概念和工质的热力性质、热力学基本理论以及热力学典型工程应用等内容。在阐明工程热力学的基本内容的同时,吸收了当今热工科技的新成果。本教材在加强基础理论学习的同时,注意联系工程实践以及学生创新能力的培养。

本教材可作为热能与动力工程,建筑环境与设备工程,过程装备与控制工程,能源、核工程及化学工程,车辆工程等专业的工程热力学教材,也可供有关工程技术人员以及各高等院校相关领域的教师、研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程热力学 / 鄂加强等编著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2010.4
21世纪高等学校精品规划教材
ISBN 978-7-5084-7451-9

I. ①工… II. ①鄂… 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(2010)第074627号

书 名	21 世纪高等学校精品规划教材 工程热力学
作 者	鄂加强 杨蹈宇 崔洪江 唐文武 编著 王汉青 主审
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 15.75 印张 373 千字
版 次	2010 年 4 月第 1 版 2010 年 4 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	28.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

从动力生产、能源节约、环境保护以及工业生产过程本身特点来看,工程专业学生应该具备合理用能、节能和环保的意识并懂得其基本的技术,而热物理基础课程的内容是合理用能及节能理论中的最基础与核心的部分。因此,作为介绍热能的有效、合理的利用和转换、传递技术的热物理基础课程,不仅是“大工程观”下能源动力类专业高等工程教育中的重要理论基础课,而且也是 21 世纪所有“大工程观”下工程专业学生的公共理论基础课。

高等工程教育的热物理基础课程和教学是培养具有热物理工程技术的“大工程观”要求的高等工程人才的唯一途径。因此,热物理基础课程和教学的改革占据着“大工程”培养观的重要地位。在“大工程观”下高等工程技术人才的培养方案中,热力学课程是整个工程专业课程体系的重要的热基础,应首先进行改革,为培养具有热物理工程技术的“大工程观”的高级工程技术人才打好热学基础。

本教材是湖南省教研教改项目“热能与动力工程专业以热动力设备排放污染及控制为特色的创新课程体系构建与实践”和湖南大学教研教改项目“大工程观背景下热物理基础课程改革与实践”中的部分研究成果,是由中国水利水电出版社组织出版的能源与动力工程专业本科系列 21 世纪高等学校精品规划教材之一。

本教材以知识基础、基本理论以及工程应用为主线,它的主要内容包括热力学知识基础、热力学基本理论和热力学典型工程应用等 3 篇,除绪论外,共 12 章。第 1 篇热力学知识基础包括第 1 章热力学基本概念和第 2 章工质的热力性质等内容,这些内容是研究与分析热力系统热能和机械能相互转化的必要的前提条件和知识基础。第 2 篇热力学基本理论主要包括第 3 章热力学第一定律、第 4 章工质的热力过程、第 5 章热力学第二定律以及第 6 章纯物质的热力学一般关系式等内容,这些内容是热力过程和热力循环分析及计算的工程热力学的理论保障。第 3 篇热力学典型工程应用针对与人们生产生活息息相关的热动力设备进行,主要包括第 7 章气体或蒸汽压缩循环、第 8 章蒸汽

动力循环、第9章气体动力循环、第10章气体与蒸汽的流动、第11章制冷循环、第12章热力学基本理论在化学过程的应用等内容,这些热力学典型工程应用所对应的热动力设备开发及其高效节能低耗散利用对人类社会的发展有着十分重要的意义。

为帮助学生复习掌握所学的理论知识,本书各章后均有一定数量的例题、思考题和习题。编写时,力求使其有代表性、启发性和灵活性。

本教材附录来源于所采用的参考书目。书中的名词术语、单位均符合国家标准。

本教材的编写分工是:绪论、第1~6章由鄂加强编写,第7~8章由杨蹈宇编写,第9章和附录由唐文武编写,第10~12章由崔洪江编写,全书由鄂加强统稿。本书的编写吸取了兄弟院校同仁们丰富的教学经验与科研成果,并参考了已出版的一些国内外教材的内容,在此一并致谢。本教材承中南大学博士生导师王汉青教授精心审阅,提出了许多宝贵意见,严格把关,对于提高书稿质量帮助极大,在此表示衷心感谢。

为适应不同专业教学的需要,使教与学能有所取舍,除基本教学内容外,书中还编写了一些在教学上可供选择的部分,这些内容采用“*”号标出。在讲授本教材过程中,可根据专业培养目标需要选择相应的教学内容。

限于编者学术水平和教学经验,书中难免存在错误和不妥之处,恳请读者及使用本书的兄弟院校师生批评指正。

编者

2009年10月

目录

前言

绪论	1
0.1 能源及其热能利用	1
0.2 热力学发展简史	2
0.3 工程热力学的主要内容及研究方法	3

第1篇 热力学知识基础

第1章 热力学基本概念	5
1.1 热力系统定义和分类	5
1.2 热能与机械能的转换	7
1.3 热力系统基本状态参数及其计量	8
1.4 热力学能、焓和熵的概念	13
1.5 热力系统状态	14
1.6 热力过程	16
1.7 热力循环	20
思考题	24
习题	24
第2章 工质的热力性质	26
2.1 工质基本概述	26
2.2 理想气体热力性质	27
2.3 实际气体热力性质	35
2.4 实际气体工质——水蒸气的热力性质	42
2.5 湿空气的热力性质	50
2.6 制冷剂的热力性质	57
思考题	58
习题	59

第2篇 热力学基本理论

第3章 热力学第一定律	62
3.1 热力学第一定律的实质	62

3.2 总储存能·····	63
3.3 热力系统与环境传递的能量·····	63
3.4 热力学第一定律解析式·····	66
3.5 开口系统能量方程·····	69
3.6 理想气体热力学能、焓和熵的变化量计算·····	73
3.7 稳态稳流能量方程的应用·····	76
思考题·····	79
习题·····	80
第4章 工质的热力过程·····	82
4.1 分析热力过程的目的及一般方法·····	82
4.2 典型可逆热力过程分析·····	83
4.3 可逆多变热力过程分析·····	90
4.4 湿空气热力过程分析·····	96
4.5 水蒸气的基本过程·····	100
4.6 非稳态流动热力过程·····	102
思考题·····	105
习题·····	106
第5章 热力学第二定律·····	110
5.1 热力学第二定律的实质和表述·····	110
5.2 可逆循环分析及其热效率·····	113
5.3 卡诺定理·····	116
5.4 熵参数、热过程方向的判据·····	118
5.5 熵增原理·····	122
5.6 熵方程·····	129
5.7 焓和熵·····	132
5.8 焓分析与焓方程·····	138
思考题·····	143
习题·····	144
第6章 纯物质的热力学一般关系式·····	148
6.1 麦克斯韦关系和热系数·····	148
6.2 熵、热力学能和焓的一般关系式·····	151
6.3 比热容的一般关系式·····	153
* 6.4 克劳修斯—克拉贝隆方程和饱和蒸汽压方程·····	155
* 6.5 单元系相平衡条件·····	157
6.6 热力学第三定律·····	160
思考题·····	162
习题·····	163

第3篇 热力学典型工程应用

第7章 气体或蒸汽压缩循环	164
7.1 活塞式气体压缩循环	164
7.2 叶轮式气体压缩循环	170
7.3 气体压缩效率	171
思考题	173
习题	173
第8章 蒸汽动力循环	175
8.1 朗肯循环	175
8.2 再热循环	180
8.3 回热循环	181
8.4 热电合供循环	185
思考题	186
习题	187
第9章 气体动力循环	188
9.1 气体动力循环概述	188
9.2 活塞式内燃机实际循环的简化	189
9.3 活塞式内燃机的理想循环	191
9.4 燃气轮机装置循环	196
思考题	202
习题	202
第10章 气体与蒸汽的流动	204
10.1 稳定流动基本概念和方程	204
10.2 滞止参数	205
10.3 喷管的计算	206
10.4 绝热节流	211
10.5 有摩阻的绝热流动	211
思考题	212
习题	212
第11章 制冷循环	214
11.1 逆向卡诺循环	214
11.2 空气压缩式制冷循环	214
11.3 蒸汽压缩式制冷循环	217
11.4 蒸汽喷射制冷循环	219
11.5 热泵循环	220
思考题	220

习题.....	221
第 12 章 热力学基本理论在化学过程的应用	222
12.1 概述.....	222
12.2 热力学第一定律在有化学反应系统内的应用.....	223
12.3 绝热理论燃烧温度.....	224
12.4 化学平衡与平衡移动原理.....	225
12.5 化学反应方向判据及平衡条件.....	226
思考题.....	228
习题.....	228
附录	230
附表 1 饱和水与饱和水蒸气表 (按温度排列)	230
附表 2 饱和水与饱和水蒸气表 (按压力排列)	231
附表 3 未饱和水与过热蒸汽表	234
附表 4 在 0.1MPa 时的饱和空气状态参数表	239
附表 5 压力单位换算表	241
附表 6 功、能和热量的换算表	241
参考文献	242

绪 论

0.1 能源及其热能利用

能源是指用来产生各种有效能量的物质资源。能源是人类赖以生存和发展所必需的燃料和动力来源，是人类社会发展生产和提高生活水平不可缺少的重要物质基础，同时，人类开发利用能源的广度和深度也与人类社会的发展史密切相连。例如，20 世纪 50 年代以来世界各国的国民经济发展表明，各工业发达国家能源消费量的增加与国民生产总值的增加呈正比关系，因此能源消费水平在一定程度上能够反映社会生产力的发展水平。

如图 0.1 所示，自然界中可被人们利用的能源主要有煤、石油、天然气等矿物燃料的化学能以及风能、水能、太阳能、地热能、原子能等。其中风能和水力能是自然界以机械能形式提供的能量，其他则主要以热能的形式或者转换为热能的形式供人们利用，可见能量的利用过程实质上是能量的传递和转换过程。据统计，全世界经热能形式而被利用的能源平均超过 85%，而我国则超过 90%，因此热能的开发及其利用对人类社会的发展有着十分重要的意义。

热能利用基本形式通常包括：
①热能直接利用，如在冶金、化工、造纸、食品、硅酸盐等工业和生活上的应用；
②热能间接利用，即把热能转化成机械能或电能，为人类社会的各方面提供动力等。18 世纪中叶以后，蒸汽机的发明实现了热能大规模、经济地转换成机械能，引起了第一次工业革命，使手工作坊式生产走向大规模的工业生产，对人类改造自然以及现代工业生产水平、现代科学技术水平和人们生活水平提高发挥了重大作用。

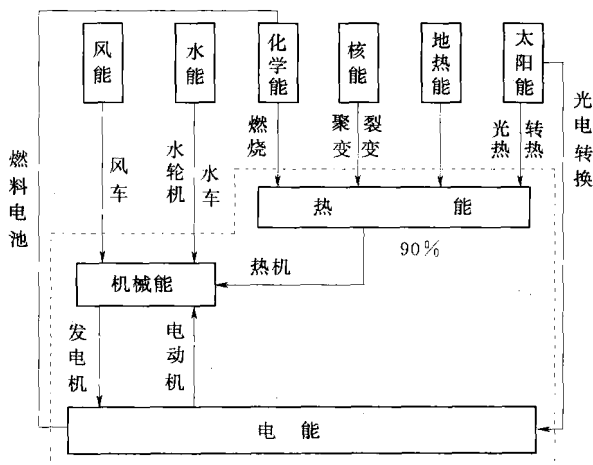


图 0.1 能源转换利用的关系

在当今科技条件下，利用得最多的能源是燃料的化学能。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。然而热能的间接利用，存在着热能转换为机械能或电能过程中的有效程度的问题。如在热力发电厂中最简单热能动力装置的热能有效利用率只有 25% 左右，即使是当代最先进的大型蒸汽动力装置的热效率也只稍超过 40%。目前正在研究的大型热

能动力装置如能按照理想工况进行运转,有可能使热能的有效利用率提高到 55% 左右。再如交通运输中的汽车、火车(蒸汽机车或内燃机车)、飞机和轮船,热能的有效利用率更低。这些热能动力装置排放到大气中的废气中不但含有大量的废热,而且还带有大量的有害物质,对人类赖以生存的环境造成了很大的污染。因此,如何在热能动力装置中提高热能的有效利用率并消除污染,是摆在热能与动力科技工作者面前的首要任务。1954 年,世界上第一座试验核电站——奥布宁斯克核电站在苏联建成,1957 年美国民用核电站——希平港核电站建成投产,这为人类和平利用核能开辟了广阔的道路。20 世纪 60 年代以来,人们开始把原子能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。目前,世界上已有包括中国在内的近 40 个国家和地区的近 500 座核电厂正在源源不断地输出电力。到 2020 年,我国核电运行装机容量为 7000 万 kW,在建 3000 万 kW。2010~2012 年内中国将开建 8 个核电站,16 台核电机组,装机容量在 1000 万 kW 以上。此外,人们也在努力地地热能、太阳能等转化为动力,供人们利用。考虑到热能通过热能动力装置转换为机械能的效率较低,因此,人们一直在寻求使热能或燃料化学能直接转换为电能的方法,如磁流体发电、燃料电池、太阳能电池等。

能源的开发利用一方面可为人类社会的发展提供必需的能量,但另一方面也造成自然环境的被破坏和被污染,如粉尘、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,开发可再生能源以及高效节能环保热动力装置,在满足人类社会能量需求的同时而又不破坏或少破坏自然环境,实现地球可持续发展,为子孙后代留下良好的生存空间是一个世界性的学术问题。

热力学是一门研究物质的热力性质、能量与能量之间传递和转换以及能量与物质性质之间普遍关系的科学。工程热力学是从工程的观点出发,研究物质的热力性质、能量与能量之间传递和转换以及热能的直接利用等问题,它着重研究的是热能与其他形式能量(主要是机械能)之间的转换规律及其工程应用。掌握工程热力学的基本原理,必将为能源、动力、化工及环境工程等领域内的深入研究打下坚实的基础。

0.2 热力学发展简史

热现象是人类最早广泛接触到的自然现象之一。传说中远古时代燧人氏的钻木取火就是机械能转换为热能,是木头温度升高而发生燃烧的事例。人类对于热的利用和认识经历了漫长的岁月,从取暖、烧饭、冶金到制造一些金属工具和兵器,历史上劳动人民有过许多发明创造。由于历代王朝的封建统治阻碍了生产力的发展,因此劳动人民的发明创造很少用来促进生产力的发展和改善人民生活,更不可能由此发展成为系统的理论,促进技术向前迈进。

直到 18 世纪初,在欧洲,由于煤矿开采、航海、纺织等产业部门的发展,产生了对热机的巨大需求,才促使热学的发展得到积极的推动。1766 年俄罗斯人波尔宗诺夫发明了最早出现于煤矿的原始蒸汽机,用以带动水泵从煤井中抽水,1784 年英国人瓦特(James Watt, 1736—1819)对当时的原始蒸汽机作了重大改进,且研制成功了应用高于大气压的蒸汽和配有独立凝汽器的单缸蒸汽机,提高了蒸汽机的热效率。此后,蒸汽机为

纺织、冶金、交通等部门广泛采用,使生产力有了很大的提高。蒸汽机的发明、改进及其应用在一定程度上刺激和推动了热力学的理论研究,促成了热力学的建立与发展。1824年,法国人卡诺(Sadi Carnot, 1796—1832)提出了卡诺定理和卡诺循环,指出热机必须工作于不同温度的热源之间,并提出了热机最高效率的概念,这在本质上已阐明了热力学第二定律的基本内容。但是,卡诺用当时流行的热质说作为其理论的依据,因而虽然他的结论是正确的,但证明过程却是错误的。在卡诺所做工作的基础上,1850—1851年间克劳修斯(Rudolf Clausius, 1822—1888)和开尔文(Lord Kelvin, 1824—1907)先后独立地从热量传递和热转变成功的角度提出了热力学第二定律,指明了热过程的方向性。

在热质说流行的年代,一些研究者用实验事实驳斥了其错误,但由于没有找到热功转换的数量关系,他们的工作没有受到重视。1842年,迈耶(Julius Robert Mayer, 1814—1878)提出了能量守恒原理,认为热是能量的一种形式,可以与机械能相互转换。1850年,焦耳(Jame Prescott Joule, 1818—1889)在他的关于热功相当实验的总结论文中,以各种精确的实验结果使能量守恒与转换定律,即热力学第一定律得到了充分的证实。能量守恒与转换定律是19世纪物理学的最重要发现。1851年,汤姆逊把能量这一概念引入热力学。

热力学第一定律的建立宣告第一类永动机(即不消耗能量就能输出功的永动机)是不可能实现的。热力学第二定律则使制造第二类永动机(只从一个热源吸热而全部转化为功的永动机)的梦想破灭。这两个定律奠定了热力学的理论基础。

热力学理论促进了热动力装置的不断改进与发展,而人类生产实践又不断为热力学理论发展提供新的驱动力。1912年,能斯特(Walter Nernst, 1869—1941)根据低温下化学反应的大量实验事实归纳出热力学第三定律(即绝对零度不能达到原理),这使经典热力学理论更趋完善。1942年,凯南(Joseph Henry Keenan, 1900—1977)在热力学基础上提出有效能的概念,使人类对能源利用和节能的认识又上了一个台阶。近代能量转换新技术,如等离子发电、燃料电池等及1974年人们确定了作为常用制冷剂的氯氟烃物质CFC和含氢氯氟烃物质HCFC与南极臭氧层空洞的联系等,向热力学提出了新的课题。总之,热力学理论将在不断解决新课题中发展。

0.3 工程热力学的主要内容及研究方法

工程热力学的研究内容主要是能量转换,特别是热能转化成机械能的规律和方法,以及提高转化效率的途径,以此来提高能源利用的经济性。本书以知识基础、基本理论以及工程应用为主线,它的主要内容包括:

(1) 热力学知识基础。主要包括热力系的基本概念(热力系的定义和分类;热力系状态和热力系过程;热力系常用的状态参数以及测量方法;焓,熵的概念和状态方程)和工质的热力性质(工质的基本概念;理想气体性质;实际气体性质)等内容,这些知识基础是研究与分析热力系统热能和机械能相互转化的必要的前提条件。

(2) 热力学基本理论。主要包括热力学第一定律(热力系之间的相互作用、热力学第一定律、稳定流动能量方程的应用)、热力学第二定律(可逆过程和不可逆过程、孤立系

统的熵增原理、有效能和有效能的分析、热机和热力学第二定律的局限性)、热力学第三定律、理想气体的热力过程(四种基本热力过程的分析 and 多变过程)以及纯物质的热力学一般关系式等内容,这些基本理论是热力过程和热力循环的分析研究及计算的工程热力学的理论保障。

(3) 热力学典型工程应用。主要包括气体的压缩(理想活塞式压气机、活塞式压气机余隙的影响、多级压缩与级间冷却和压气机的效率)、蒸汽动力循环(水蒸气的定压发生过程、朗肯循环、蒸汽参数对循环热效率的影响和再热循环和回热循环)、气体动力循环(汽油机实际工况与理想工况、柴油机实际工况与理想工况、燃气轮装置定压加热循环、活塞式热气发动机及其理想循环)、制冷循环(逆向卡诺循环、压缩制冷循环、蒸汽喷射制冷循环、热泵供热循环)、气体与蒸汽的可逆流动(稳定流动基本概念和方程、定熵流动、滞止参数、喷管的计算、绝热节流、混合流动、有摩擦的绝热流动)、热力学基本理论在化学过程的应用(化学反应系统的热力学第一定律应用、绝热理论燃烧温度、化学平衡与平衡移动原理和化学反应方向判据及平衡条件)等内容,是热力学基本理论在工程应用的重要实例。

热力学的研究方法有宏观研究方法和微观研究方法两种。应用宏观方法研究的热力学叫做宏观热力学(也叫经典热力学)。应用微观研究方法研究的热力学称为微观热力学(也称统计热力学)。所谓宏观热力学是指以热力学第一定律、第二定律等基本定律为热力过程和热力循环的分析研究及计算基础,针对具体热力学问题采用抽象、概括、理想化和简化的方法,建立热力学模型,并得到若干重要结论。由于热力学基本定律的可靠性以及它们的普适性,所以应用热力学宏观研究方法可以得到可靠的结果。但由于宏观研究方法不考虑物质分子和原子的微观结构,也不考虑微粒的运动规律,故宏观热力学理论并不能解释热现象的本质及其内在原因。而气体分子运动学说和统计热力学认为,大量气体分子的杂乱运动服从统计法则和概率法则,因此,可以应用统计法则和概率法则从微观角度对热力学问题进行研究。所谓微观热力学是指从物质是由大量分子和原子等粒子所组成的事实出发,将宏观性质作为在一定宏观条件下大量分子和原子的相应微观量的统计平均值,利用量子力学和统计方法,将大量粒子在一定宏观条件下一切可能的微观运动状态予以统计平均,来阐明物质的宏观特性,并导出热力学基本规律,因而微观热力学能阐明热现象的本质,解释“涨落”现象。在对分子结构作出模型假设后,利用统计热力学方法还可对这种物质的具体热力学性质作出预测。但统计热力学也有局限性,因为对分子微观结构的假设只能是近似的,因此尽管运用了繁复的数学运算,所求得的结果往往不够精确。

工程热力学主要应用热力学的宏观方法,但有时也引用气体分子运动理论和统计热力学的基本观点及研究成果。随着现代计算机技术和信息技术的飞速发展,计算机和信息技术越来越多地被引入工程热力学的研究中,成为一种强有力的工具。

要学好工程热力学,必须要注意以下问题:①掌握工程热力学课程目的与任务,即研究热能转化为机械能的规律、方法以及怎样提高转化效率和热能利用的经济性;②在深刻理解基本概念的基础上运用抽象简化的方法得出各种具体热力学问题的本质,并应用热力学基本定理和基本方法对各种具体热力学问题进行分析研究;③必须重视习题、实验等环节,通过它们可以培养抽象、分析问题的能力,加深对基本概念的理解。

第1篇 热力学知识基础

热力学基本概念主要包括热力系统定义和分类, 热能与机械能的转换, 热力系统基本状态参数及其计量, 热力学能、焓和熵的概念, 热力系统状态, 热力过程, 热力循环等, 为热力系统热能和机械能相互转化研究与分析提供了必要的前提条件, 然而, 热能和机械能相互转化时的能量的传递(吸热或者放热)与转换(做功)不仅与工质的状态变化过程有关, 而且还与工质本身的热力性质有密切关系, 因此, 研究与分析热力系统的能量的传递与转换, 还必须掌握常用工质的热力性质。

因此, 热力学基本概念和工质的热力性质是热力学基本理论及其工程应用的知识基础。

第1章 热力学基本概念

1.1 热力系统定义和分类

1.1.1 热力系统定义

分析任何事物均需选择一定的研究对象, 如力学中研究物体运动时总是取分离体一样, 工程热力学中也常把研究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和物质的传递。这种被人为分割出来作为热力学分析对象的有限物质系统叫做热力系统, 周围物体统称环境, 热力系统和环境之间的分界面叫做边界, 其关系图如图 1.1 所示。当然热力系统和环境之间的关系是相对的, 当以图 1.1 中的环境为待研究对象时, 此时环境被称为热力系统, 而图 1.1 中的热力系统被称为环境。此外, 不管是热力系统还是环境, 都可以包含若干个子热力系统。

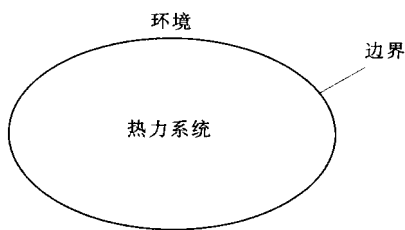


图 1.1 热力系统、边界和环境关系图

热力系统和环境之间的边界可以是固定不动的, 也可以有位移和变形。如图 1.2 所示, 当取发动机气缸中的工质(燃气)作为热力系统时, 工质和气缸壁之间的边界是固定不动的, 但工质和活塞之间的边界却可以移动而不断改变位置。此外, 热力系统和环境之间的边界可以是固定的或者是运动的, 也可以是实际存在的或者是假想的。如图 1.3 所示, 当取汽轮机中的工质(水蒸气)作为热力系统时, 工质和汽轮机之间存在着实际的边界, 而进口前后或出口前后的工质之间却并无实际的边界, 此处可人为地设想一个边界把

系统中的工质和环境分割开来。

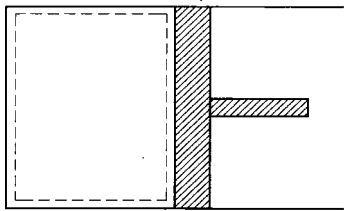


图 1.2 边界为固定的或运动的

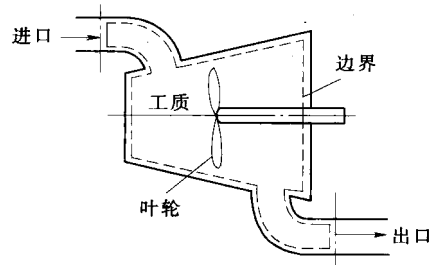


图 1.3 边界为实际的或者假想的

1.1.2 热力系统分类

根据热力系统和环境之间能量和物质交换的不同情况，可将热力系统分为各种不同的类型。

(1) 闭口系统。当热力系统与环境之间只有能量交换而无物质交换，则该热力系统被称为闭口系统。由于闭口系统内的质量保持恒定不变，所以闭口系统又叫做控制质量。

(2) 开口系统。当热力系统与环境之间不仅有能量交换而且有物质交换，则该热力系统被称为开口系统。开口系统中的能量和质量都可以变化，但这种变化通常是在某一划定的空间范围内进行的，所以开口系统又叫做控制容积或控制体。

(3) 绝热系统。当热力系统与环境之间无热量交换时，则该热力系统被称为绝热系统。

(4) 孤立系统。当热力系统与环境之间既无能量交换也无物质交换时，该系统被称为孤立系统。孤立系统的一切相互作用都发生在系统内部。

热力系统的选取具有人为性特征，可根据研究问题的实际情况而定，以能给解决问题

带来方便为原则。如图 1.4 所示，当选取 1 为热力系统时，1 和环境中的子系统 2 有物质交换，和环境中的子系统 3 有热量交换，和环境中的子系统 4 有功量交换，因此，1 为开口系统。当选取 1+2 为热力系统时，1+2 和环境之间无物质交换，和环境中的子系统 3 有热量交换，和环境中的子系统 4 有功量交换，因此，1+2 为闭口系统。当选取 1+2+3 为热力系统时，1+2+3 和环境之间既无物质交换，也无热量交换，但和环境中的子系统 4 有功量交换，因此，1+2+3 为绝热闭口系统。当选取 1+2+3+4 为热力系统时，1+2+3+4 和环境之间既无物质交换，也无热量交换和功量交换，因此，1+2+3+4 为孤立系统。可见，非孤立系统和相关环境结合在一起，就构成孤立系统。

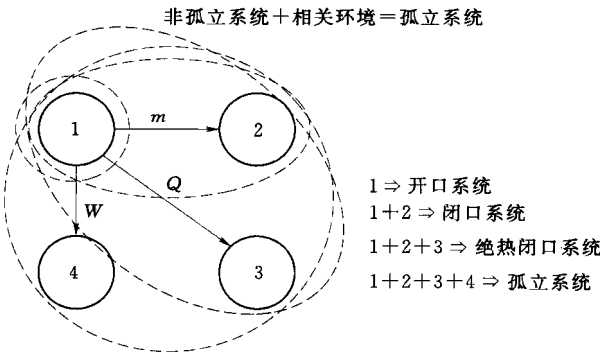


图 1.4 热力系统选取的人为性

在热动力工程中，最常见的热力系统是由可压缩流体（如空气、燃气、水蒸气等）构

成的。因此，根据热力系统内部状况还可以划分为：

- (1) 可压缩系统。由可压缩流体组成的系统。
 - (2) 简单可压缩系统。与环境之间在忽略摩擦阻力情况下的功交换只有体积变化功（膨胀功或压缩功）一种形式，则该热力系统称为简单可压缩系统。
 - (3) 均匀系统。由单相组成的内部各部分化学成分和物理性质都均匀一致的系统。
 - (4) 非均匀系统。由两个或两个以上的相所组成的内部各部分化学成分和物理性质不均匀一致的系统。
 - (5) 单元系统。一种均匀的和化学成分不变的物质组成的系统。
 - (6) 多元系统。由两种或两种以上物质组成的系统。
 - (7) 单相系。系统中工质的物理、化学性质都均匀一致的系统称为单相系。
 - (8) 复相系。由两个相以上组成的系统称为复相系，如固、液、气组成的三相系统。
- 一般而言，工程热力学讨论的大部分系统都是简单可压缩系统。

1.2 热能与机械能的转换

目前，热动力工程所利用的热源物质主要是煤、石油、天然气等矿物燃料。所谓热能动力装置（简称热机），是指从燃料燃烧中得到热能，并利用热能得到动力的整套设备（包括辅助设备）。一般的，热能动力装置可分为燃气动力装置和蒸汽动力装置两大类。

1.2.1 燃气动力装置

以活塞式发动机为例，分析说明燃气动力装置中热能与机械能的转换情况。如图 1.5 所示，活塞式发动机的主要包括气缸、活塞、曲柄连杆机构、飞轮、进气阀和排气阀等。燃料和空气的混合物在气缸中燃烧，释放出大量热能，使燃气的温度、压力大大高于周围介质的温度和压力而具备做功的能力。燃气在发动机气缸中膨胀做功，推动活塞，从事使得燃气的能量通过曲柄连杆机构传给装在发动机曲轴上的飞轮，转变成飞轮的动能，而飞轮的转动带动曲轴，并通过机械轴向外输出机械功，同时完成活塞的逆向运动，排出废气，为下一轮进气做好准备，如此周而复始。于是，每经过一定的时间间隔，燃料和空气即被送入气缸中，并在其中燃烧、膨胀，推动活塞做功。这样，活塞不断地往复运动，曲轴则连续回转，而飞轮则将所得到的能量一部分作为带动活塞逆向运动所需的能量，其余部分作为传递给工作机械加以利用。此外，排出的废气把一部分燃料化学能转换来的热能排向环境大气。

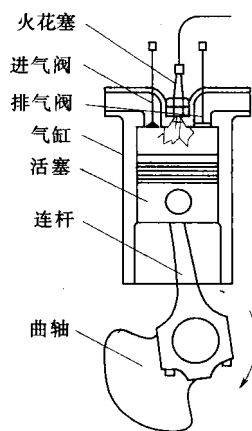


图 1.5 活塞式发动机示意图

1.2.2 蒸汽动力装置

以燃煤电站锅炉为例，分析说明蒸汽动力装置中热能与机械能的转换过程。蒸汽动力装置的系统简图如图 1.6 所示，这是由锅炉、汽轮机、冷凝器、水泵等组成的一套热力设备。煤粉在锅炉炉膛中燃烧，使化学能转变为热能，锅炉沸水管内的水吸热后变为蒸汽，并且在过热器内过热，成为过热蒸汽，它的温度、压力比环境介质（空气）的温度及压力

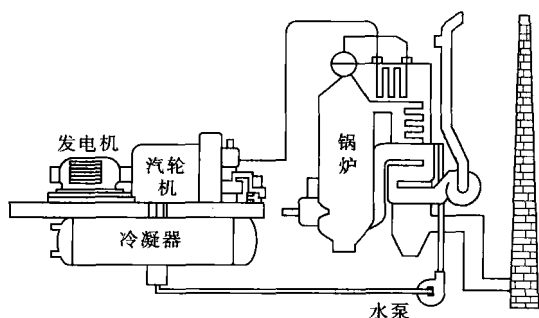


图 1.6 燃煤电站锅炉系统简图

高，具有做功的能力；当过热蒸汽被导入汽轮机后，先通过喷管膨胀，速度增大（该热力过程中热能转变成动能），于是具有一定动能的蒸汽推动叶片，使轴转动做功。做功后的乏汽从汽轮机进入冷凝器，被冷却水冷凝成水，并由水泵加压后送入锅炉加热。如此周而复始，通过锅炉、汽轮机、冷凝器等不断把煤粉中的化学能转变而来的一部分热能转变为功，其余部分热能则排向环境介质。

1.2.3 热能动力装置的本质

从上述两种热机的工作情况可以看出，活塞式发动机和燃煤电站锅炉构造不同，其工作特性也不相同。例如，活塞式发动机的工质（燃气）燃烧、膨胀、压缩和排气都发生在同一气缸内，且燃气的膨胀过程发生在燃气无宏观运动的状况下；而蒸汽动力装置中工质（蒸汽）的吸热、膨胀、冷凝等过程分别发生在不同的设备中，尽管进入喷管时蒸汽速度较低（20~50m/s），但经过喷管充分膨胀后冲出喷管时蒸汽的速度却可达到很高（500~1200m/s），因此蒸汽的膨胀过程是发生在有宏观运动的状况下。当然，其他型式的热机可能还有其他的构造以及相应的工作特性，但总体看来，不管哪一种热能动力装置，总是用某种媒介物质（即工质）从某个热源获取热能，从而具备做功能力并将所得到的一部分热能对机器做功，并把其余部分热能则排向环境介质。因此，工程热力学不深入研究各种热机的具体结构和各自的特性，而是抽取所有热机的共同问题进行探讨。

综上所述，对于任何一种热能动力装置而言，吸热、膨胀做功、排热都是共同的，也是本质性的。因此，可实现热能和机械能相互转化的媒介物质叫做工质；把工质从中吸取热能的物系叫做高温热源（或称热源）；把接受工质排出热能的物系叫低温热源（或称冷源）。当然，高温热源和低温热源可以是恒温的，也可以是变温的。如利用燃气轮机的高温排气作为高温热源向余热锅炉供热，使余热锅炉中的水升温，由于高温热源的热容量不是无穷大，故而高温热源（燃气轮机的排气）的温度不断下降，是变温热源。又如用环境大气作低温热源，由于其热容量非常大，故可以认为是恒温热源。

因此，热能动力装置的工作过程可概括成：工质自高温热源吸热，将其中一部分转化为机械能而做功，并把余下部分传给低温热源。

1.3 热力系统基本状态参数及其计量

热能动力装置中的工质必须通过吸热、膨胀、压缩、排热等过程才能完成将热能转变为机械能的工作，其物理特性随时在变化，或者说，工质的宏观物理状况随时在起变化。因此，把工质在热力变化过程中的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，这些用来描述工质所处状态的宏观物理量称为状态参数，如温度 T 、压力 p 、容积 V 等状态参数可反映大量分子运动的宏观