

普通高等教育规划教材



工程热力学

章学来 主 编
曹红奋 梅国梁 副主编



人民交通出版社
China Communications Press

普通高等教育规划教材

Gongcheng Reli Xue
工 程 热 力 学

章学来 主 编
曹红奋 梅国梁 副主编

人 民 交 通 出 版 社

前言

本书根据国家教育部制订的《面向21世纪教学内容和课程体系改革计划》及多学时《工程热力学课程教学基本要求》(1995年修订版),参照轮机工程、热能与动力工程专业的教学大纲,博采众长,同时吸取作者多年教学和科研工作的体会及热工课程建设的成果,在《工程热力学》(2000年版本)的基础上改编而成。

本书系统清晰、简明,共有五个部分:热力学基本概念和基本定律、工质的热力性质、热力过程及热力循环、化学热力学原理、溶液热力学基础。为适应当今世界科技的发展及满足国家经济建设的要求,同时考虑满足教学基本要求和适应专业要求面宽的特点,对内容及章节的编排作了必要的调整,增加了化学热力学基础、溶液热力学基础两章。本书注意加强基础理论的阐述,注重理论与工程实践的联系;结合课程特点注意热力学方法的引导和训练,以提高学生的相关科学素养。为便于学生自学或复习,各章附有小结、思考与练习。附录有较详细的工质热力性质资料。

全书采用“中华人民共和国法定计量单位”,并附有各种单位的换算。

本书为大学本科多学时的工程热力学教材或教学参考书,适合轮机工程、热能与动力工程、建筑环境与设备工程、能源工程及自动化等专业的学生使用,也可供海船轮机长、轮机员适任证书考证培训及有关工程人员参考。

本书于2000年由上海交通大学出版社出版了初版,该版由吴孟余教授主编,章学来、梅国梁、曹红奋参编。该书注意结合轮机工程实践,培养学生应用热力学知识解决工程实际问题的能力,为《工程热力学》的重新编写打下了扎实的基础,在此对吴孟余教授表示衷心的感谢。

本书由上海海事大学章学来任主编,上海海事大学曹红奋、梅国梁任副主编,西安建筑科技大学赵蕾、上海海事大学蒋爱国参编。其中,章学来编写概论、第一章、第三章、第四章、第五章、第六章、第十二章、第十三章、第十四章和附录,曹红奋编写第二章、第七章,赵蕾编写第八章,梅国梁编写第九章,蒋爱国编写第十章、第十一章。全书由章学来统稿。

由于编者水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

目录

绪论	1
第一章 基本概念	10
第一节 热力系统	10
第二节 工质的热力状态及其基本状态参数	11
第三节 平衡状态及状态方程	15
第四节 准平衡过程及可逆过程	17
思考与练习	19
第二章 热力学第一定律	22
第一节 热力学第一定律的实质	22
第二节 能量的传递与转化	23
第三节 热力学能及焓	27
第四节 热力学第一定律的能量方程式	29
第五节 稳定流动能量方程的应用	32
思考与练习	38
第三章 热力学第二定律	41
第一节 循环	41
第二节 热力学第二定律的实质	44
第三节 卡诺定理和卡诺循环	45
第四节 克劳修斯不等式	50
第五节 熵	52
第六节 孤立系统熵增原理	54
第七节 焓和焓	57
第八节 焓分析与焓方程	60
思考与练习	63
第四章 理想气体的性质	66
第一节 理想气体状态方程	66
第二节 理想气体的比热容	67
第三节 理想气体热力学能、焓、熵的计算	73
第四节 理想气体混合物	76
思考与练习	82
第五章 实际气体的性质及热力学一般关系式	84

第一节	理想气体状态方程用于实际气体的偏差	84
第二节	实际气体状态方程	85
第三节	对应态原理与通用压缩因子图	87
第四节	维里方程	88
第五节	麦克斯韦关系和热系数	88
第六节	比热容、热力学能、焓和熵的一般关系式	91
	思考与练习	92
第六章	水蒸气与湿空气	95
第一节	水蒸气的发生过程	95
第二节	水蒸气表和图	98
第三节	水蒸气的热力过程	102
第四节	湿空气及其状态参数	105
第五节	湿空气的焓湿图	108
第六节	湿空气的热力过程	110
	思考与练习	115
第七章	理想气体的热力过程	117
第一节	基本热力过程	117
第二节	多变过程	124
	思考与练习	127
第八章	气体和蒸汽的流动	131
第一节	一维绝热稳定流动的基本方程式	131
第二节	喷管和扩压管的流动特性及其截面变化规律	133
第三节	喷管的计算	136
第四节	工作条件变化对喷管内流动过程的影响分析	144
第五节	具有摩擦的绝热流动	145
第六节	绝热节流	147
第七节	绝热混合流动	149
	思考与练习	152
第九章	压气机的热力过程	155
第一节	活塞式压气机的压气过程	155
第二节	单级活塞式压气机的工作原理	157
第三节	多级压缩和级间冷却	160
第四节	叶轮式压气机的工作原理	163
第五节	压气机的效率及焓分析	166
第六节	引射式压缩机	168
	思考与练习	169
第十章	气体动力循环	171
第一节	活塞式内燃机的理想循环	171
第二节	活塞式内燃机理想循环热效率	173
第三节	燃气轮机循环	179

第四节	增压内燃机理想循环	183
	思考与练习	185
第十一章	蒸汽动力装置循环	186
第一节	概述	186
第二节	基本蒸汽动力循环——朗肯循环	186
第三节	再热循环与回热循环	190
第四节	热电循环	193
第五节	蒸汽—燃气联合循环	194
	思考与练习	195
第十二章	制冷循环	197
第一节	理想制冷循环	197
第二节	压缩空气制冷循环	198
第三节	蒸汽压缩制冷循环	201
第四节	制冷工质的热力性质	205
第五节	吸收式制冷循环	209
第六节	蒸汽喷射制冷循环	210
第七节	吸附式制冷循环	211
第八节	热泵供热循环	212
第九节	气体的液化	214
第十节	蒸汽压缩制冷循环的焓分析	215
	思考与练习	221
第十三章	化学热力学基础	224
第一节	概述	224
第二节	质量守恒定律在化学反应中的应用	224
第三节	热力学第一定律在化学反应中的应用	225
第四节	反应热与反应热效应的计算	230
第五节	热力学第二定律在化学反应中的应用	231
第六节	离解与化学反应定温方程	234
第七节	热力学第三定律	236
	思考与练习	237
第十四章	溶液热力学基础	239
第一节	偏摩尔量与化学势	239
第二节	稀溶液和理想溶液	241
第三节	逸度与活度	244
第四节	二元溶液的温度—浓度图和焓—浓度图	245
	思考与练习	249
附录		250
附表 1	气体的热力性质	250
附表 2	饱和水与饱和水蒸气的热力性质表(按温度排列)	251
附表 3	饱和水与饱和水蒸气的热力性质表(按压力排列)	253

附表 4	未饱和水与过热水蒸气的热力性质表	255
附表 5	R134a 饱和液体与饱和蒸汽表	259
附表 6	R134a 过热蒸汽表	263
附表 7	R22 饱和液体与饱和蒸汽表	271
附表 8	R22 过热蒸汽表	273
附表 9	饱和空气表($p_0 = 0.1 \text{MPa}$)	277
附图 1	水蒸气的焓—熵图	插页
附图 2	R134a 压焓图	279
附图 3	R22 压焓图	280
附图 4	氨的压焓图	281
附图 5	湿空气焓湿图(大气压 0.1013MPa)	282
主要符号	283
参考文献	285

绪 论

一、能源及热能的利用

人类几千年的文明史是和生产力的发展紧密相连的,而对于能源的开发和利用又是生产力发展的重要基础。迄今为止,自然界中可被利用的能源主要有:太阳能、风能、水能、地热能、燃料的化学能和核能等。

太阳能是非常巨大的能量,计算表明,每秒钟太阳辐射到达地球的能量,相当于 500 万吨煤燃烧所放出的能量。风能、水能也是自然界中可利用的重要能源,通常以机械能的形式提供给人们使用。煤炭、石油和天然气等燃料的化学能,是人类利用最基本、最主要的能源,通过燃烧将其化学能转变为热能。地热能是地球内部所拥有的、能被人类直接利用的热能,其资源十分丰富,但由于从地下提取地热能代价太大,因此地热能目前只占人类能源利用的极小部分。核能是某些物质内部进行的核反应—裂变反应或聚合反应时所释放的能量,这些能量都以高温热能的形式提供出来。

我国能源资源十分丰富,但由于人口众多,人均能源占有量仅为世界平均水平的一半。此外我国能源工业还比较落后,能源产量有限,加上工业现代化水平较低,以致当前能源供需矛盾十分突出。随着我国国民经济的发展和人民生活水平的提高,能源需求将越来越大。因此开发和节约能源、合理与有效地利用能源将是我国一个长期的战略任务。

能源的利用主要是指热能的利用,热能的有效利用是能源利用的核心。热能的利用通常分为直接利用和间接利用两种基本形式。直接利用如工业生产中的采暖、加热、烘干、冶炼、蒸煮等;间接利用即把热能转换为机械能或电能等。

在船舶营运中,除辅助锅炉、海水淡化、燃油加热等直接利用热能外,机舱中及甲板上的各种设备都是利用主机所产生的机械能及辅机所产生的电能,故皆属间接利用。因此,怎样有效地将热能转换为机械能或电能,对降低船舶的能耗以提高营运的经济效益,有着重大意义。交通运输行业与其他经济部门相比,热能的有效利用率显得更低,一般低于 35%,许多尚能利用的余热随废气而排放到大气与海洋中去,造成了能源的浪费、环境的污染。所以,对船舶热能管理人员来说,应科学地管理各类船舶热力设备,有效地实现各种能量转换,开展好节能工作,以提高船舶运输的经济效益,使我国的海洋运输事业得到更大的发展。

二、热力学发展简史

工程热力学是研究热能与其他形式能量相互转换规律的一门科学,是人类千百年来不断发展和改善热能利用的经验总结。工程热力学的发展史,反映了人类对热能的本质以及能量相互转换规律的认识、掌握和运用的历史。这个历史还远远没有完结,它将随着人类文明的进步而不断地延伸下去。

自从人类在远古时代发现了火以后,寻求对热和冷现象本质的理解,一直是人类对大自然法则的主要探索之一。在长期的生活和生产过程中,人类逐步积累了丰富的热知识。人类最

早利用热现象为自己服务,虽可追溯到钻木取火的时期,但研究热现象并使之成为一门科学,则直到 19 世纪中叶才得以完成。18 世纪中叶瓦特发明的蒸汽机,实现了大规模的热能到机械能的转换,推动了欧洲的工业革命,也激发了人们研究热现象的兴趣。为了提高蒸汽机的效率和性能,人们开始了对热力原动机的广泛研究,并由此推动了热学方面系统的理论研究,促成了热力学这门科学的建立和发展。但是,直到 18 世纪末,一种错误的热素说仍广为流传。热素说认为:热是一种没有质量的、不生不灭的物质,称作“热素”,它可以透入一切物体,物体的热和冷取决于所含热素的多少。由于热素说无法解释诸如摩擦生热等现象,人们开始认为热应该是和物质运动相关联的。伦福德于 1798 年首先指出,制造大炮时炮筒和切屑都产生高温,但并没有热素流入,因此热必定与切削时的运动有关。1842 年迈耶首先提出热是一种能量形式,它可以和机械能相互转换,但总的能量保持不变。到 1850 年,焦耳以多种实验方法测定了热和功的当量关系。至此,关于能量守恒与转换的原理,即热力学第一定律,终于取代热素说而得以确认。热力学第一定律的建立为热力学这门学科奠定了基础。

热力学第一定律只是指出了能量转换过程中的守恒关系,而不能解决转换效率问题。蒸汽机应用初期的低效率促使人们去研究能量转换效率问题。1824 年卡诺在研究提高蒸汽机效率的基础上最先指出,热机必须在不同温度的热源之间工作(凡有温差之处,就能产生动力),而热机的工作效率取决于高温热源和低温热源的温度,就像水轮机的工作效率取决于高、低水位的落差一样。卡诺的研究涉及热能转变为机械能的条件和效率(即热力学第二定律的内容),但卡诺所处的时代,热素说还占统治地位,卡诺也不例外,他的结论虽然是正确的,但他对热能本质的理解却是错误的,他只是猜到了热力学第二定律。根据卡诺的理论,1844 年开尔文(Kelvin)制定了绝对温度标尺。1850 年至 1851 年,克劳修斯(Clausius)和开尔文分别提出了不同形式的热力学第二定律,这个定律指明了能量转换的极限和能量转换过程的方向性。开尔文指出:“不可能从单一热源吸热而完全转变为有用功而不产生任何变化”。克劳修斯指出:“不可能将热量由低温物体传向高温物体而不付出任何代价”,并以这一表述为前提正确论证了卡诺定理。

热力学第一和第二定律组成了一个系统完整的热力学体系,指导了热机的发展和不断完善,并被推广应用于其他科技领域。

此后,能斯特于 1912 年在研究低温现象的基础上提出了绝对零度不可能达到的原理,也被称作热力学第三定律。基南于 1942 年提出可用能的概念,并在热能工程中得到广泛应用和发展。

热力学的建立与它在理论上所取得的成就,促进了热机的发展及其性能的改善。19 世纪后期,蒸汽机已不能满足工业生产发展的需要。因此,19 世纪末又发明了汽轮机和内燃机。目前,汽轮机已成为火力发电厂的主要动力设备,内燃机则逐步成为汽车、飞机、船舶和机车等交通工具的主要原动机。随着汽轮机及内燃机应用领域的扩展,促进了其工质性质及动力循环的研究。进入 20 世纪,人们又发明了燃气轮机、喷气发动机。50 年代核能动力装置的建成,为人类开辟了能源利用的新纪元。综上所述,热力学理论在生产实践和科学实验中建立并充实,反过来,它又推动了生产和科学技术的发展,这正是一切科学理论和科技、生产互动发展的普遍规律。

三、能量转换主要热力设备简介

本节将简单介绍内燃机、蒸汽动力装置、燃气轮机装置,以了解其进行的热能转换为机械

能的过程。与此同时,还将简要介绍蒸汽压缩制冷装置的工作过程。

1. 内燃机

内燃机是 19 世纪末出现的一种热动力装置。它重量轻、体积小、使用方便、热效率高,因而得到了广泛的应用。

内燃机是现代船舶的主要动力机械。在内燃机的气缸内反复进行着“吸气、压缩、燃烧与膨胀、排气”四个过程,从而使能量实现由“燃料的化学能转变成热能”,再由“热能转变为机械能”的过程。

在内燃机中,凡上述四个过程在活塞运动四个冲程内完成的,称为“四冲程内燃机”;而在二个冲程内完成的,称为“二冲程内燃机”。根据燃料种类的不同,内燃机可分为柴油机和汽油机。

图 0-1 为四冲程柴油机的示意图。其工作过程分为吸气、压缩、燃烧、膨胀及排气几个阶段。吸气开始时进气阀打开,排气阀关闭,活塞向下运动把空气吸入气缸。当活塞到达下止点时,进气阀关闭,吸气过程结束。然后活塞向上运动压缩气缸内的空气,而使空气的压力和温度不断提高。当活塞运动到接近上止点时,喷油嘴适时地把适量柴油喷入气缸。由于这时气缸中的温度已超过柴油的自燃温度,因而当活塞到达上止点时,柴油正好开始猛烈燃烧。燃烧过程进行得很快,当活塞稍微离开上止点时,燃烧过程已结束。接着燃烧产生的高温高压燃气发生膨胀,推动活塞向下运动并输出机械功。活塞到达下止点时排气阀打开。因气缸内气体的温度和压力还比较高,故当排气阀打开时立即有一部分气体冲出气缸排入大气,使气缸压力降至大气压力。接着,在活塞向上运动时气缸内剩余的气体被活塞从气缸排至大气中,直到活塞到达上止点时排气完毕。当活塞再一次自上止点向下运动时又重新吸气,重复上述工作循环。

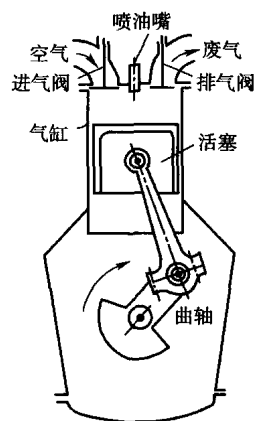


图 0-1

汽油机的工作过程基本上和柴油机差不多。对于汽化器式或进气道燃油喷射式汽油机,汽油预先在化油器内或进气道内雾化并和空气混合成可燃气体,在吸气过程中一起被吸入气缸。在压缩终了活塞接近上止点时,混合气体的温度仍低于其自燃温度,必须用电火花点燃后才开始燃烧过程。其他过程则和上述柴油机的工作过程一样。

2. 蒸汽动力装置

蒸汽动力装置是应用最早的一种热动力装置。由于它可燃用固体燃料,甚至廉价的劣质燃料,又可以制成功率很大的机组,因此蒸汽动力装置是一种极重要的动力设备。它主要用作热力发电厂的动力设备。

图 0-2 为简单蒸汽动力装置的示意图。它由锅炉、汽轮机、冷凝器及给水泵四部分组成。锅炉产生的高温高压的过热蒸汽首先送入汽轮机做功。在汽轮机中(图 0-3),蒸汽通过喷管提高流速后,高速流过涡轮的叶片推动涡轮转动,使汽轮机输出机械功,驱动发电机发电。从汽轮机排出的乏汽被引入冷凝器,并在其中被冷却水冷却而凝结成水。乏汽凝结时,其体积骤降为原体积的万分之一左右,因而在冷凝器中及汽轮机出口处造成很高的真空度,使蒸汽在汽轮机中得到更加充分的膨胀,从而能推动涡轮作出更多的机械功。从冷凝器出来的冷凝水经给水泵加压后重新送回锅炉,受热产生蒸汽。在锅炉中,供燃料燃烧用的空气从大气吸入后,先在锅炉的空气预热器中受热提高温度,然后送入炉膛和燃料混合并进行燃烧,把燃料的化学

能转变成热能,产生高温的烟气。锅炉中的水先在省煤器中利用高温的烟气加热提高温度,然后进入其中的对流管束及水冷壁等蒸发受热面,受热汽化而产生水蒸气,再进一步在过热器中继续受热升高温度成为过热蒸汽。于是,过热蒸汽又可送往汽轮机膨胀做功,重复上述循环过程。

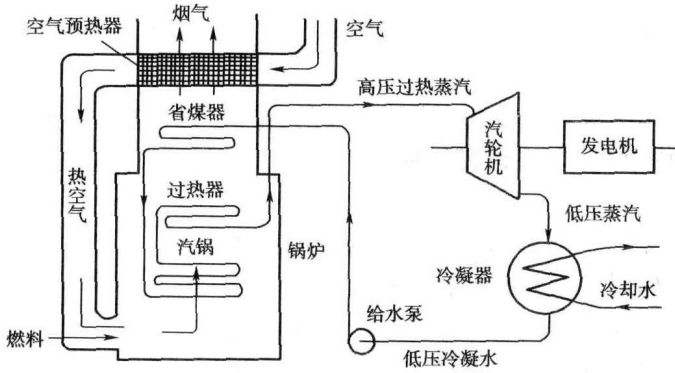


图 0-2

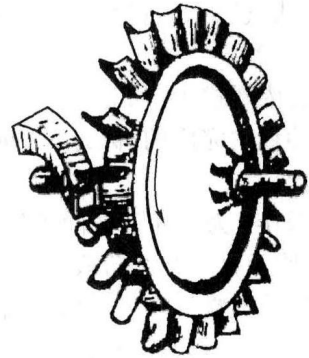


图 0-3

3. 燃气轮机装置

燃气轮机装置是一种 20 世纪 40 年代后才得到迅速发展的热动力装置。由于它是叶轮机,具有转速高及工质流量大等优点,因此使得它首先在航空上得到应用,燃气轮机装置和喷气技术相结合的航空用涡轮喷气发动机已成为航空发动机最主流的类型。此外,燃气轮机也常用作舰船动力设备及发电装置的动力设备。

图 0-4 为燃气轮机装置的示意图。它由压气机、燃烧室及燃气轮机三部分组成。由大气吸入空气后,在压气机中对空气进行增压,提高空气的压力及温度。经增压后的空气送至燃烧室,一部分空气供喷入燃烧室的燃料进行燃烧用,另一部分空气则用于和燃烧生成的高温燃气混合,以降低燃气的温度,使进入燃气轮机的燃气温度和涡轮叶片允许的最高温度相适合。当燃气进入燃气轮机后,先在喷管中提高流速,然后高速流过涡轮的叶片,推动涡轮转动并输出机械功,其工作过程与汽轮机的工作过程相同。作功后的高温废气直接排入大气中。

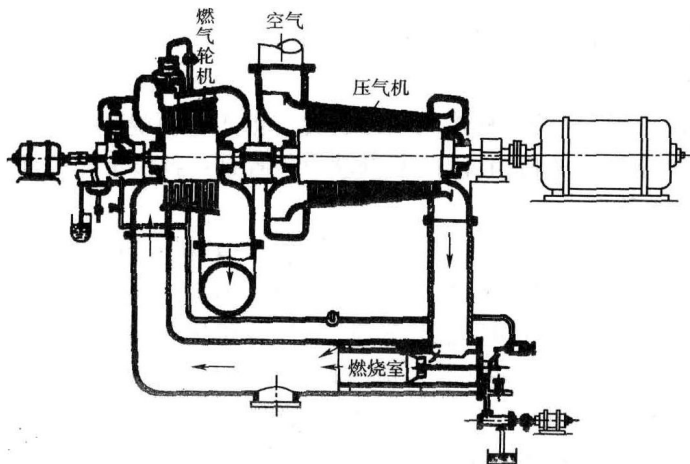


图 0-4

4. 蒸汽压缩制冷装置

制冷是以消耗机械功或其他能量为代价,使物体获得低于周围环境的温度并维持该低温。制冷在生产和生活中的应用极为广泛。

蒸汽压缩制冷装置是常见的一种制冷装置,图 0-5 为蒸汽压缩制冷装置的示意图。高压常温的液体工质先经节流阀节流降压,使温度降至所需的低温。然后把低温液态工质送入冷藏库的蒸发器中,便可从冷藏库内吸热而使这些物体处于低温。当低温液态工质吸热后,便汽化成为低压蒸汽。于是再送入压缩机压缩提高压力,经冷凝器冷却降温,重新得到高压常温的液体工质,重复上述循环过程。

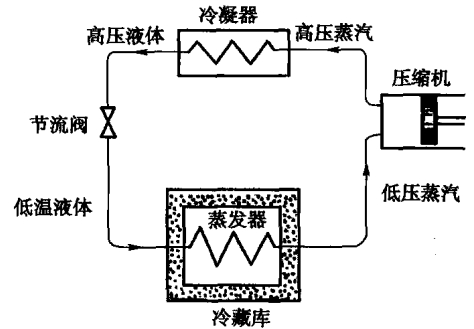


图 0-5

综上所述,由各种热能动力装置的工作过程可知:为实现热能转换为机械能,总是利用工质吸收燃料燃烧产生的热能,使工质体积膨胀作机械功。但为了连续地实现这种能量转换,必须接着使工质向环境放热或排出废气,以便重新开始新的吸热过程,重复地循环工作。而蒸汽压缩制冷装置的工作过程则是:通过降压过程可使常温工质达到所需的低温,并用来制冷。但为了连续地实现制冷,必须消耗机械功或其他能量压缩工质提高其压力,然后经过冷却,即向环境放热而使工质恢复高压常温的状态,以便重新通过降压降温用于制冷,重复循环工作。

为了合理地设计各种能量转换设备,必须掌握热能和机械能转换的规律,以及能量转换过程的分析方法,这些正是工程热力学所要研究的内容。

四、工程热力学的研究对象及研究方法

热力学是研究能量及其转换规律的科学,而工程热力学是热力学的一个分支,它是研究热能与机械能及其相互转换规律的科学,其名称冠之以“工程热力学”,正是说明它和热能工程联系的紧密性。它的发展与热能工程的发展,特别是热机生产实践的发展息息相关。热机的生产实践中的种种问题促进了工程热力学学科的形成与发展。这些问题可归纳为:

(1) 热能与机械能相互转换的基本规律。在热能与机械能的相互转换中,其量有什么关系? 热能与机械能相互转换有否限制? 有无方向性? 怎样从质的角度,来探讨热能与机械能的相互转换? 这些问题是工程热力学的基本定律,即热力学第一定律与热力学第二定律所揭示的内容。

(2) 工质的热力性质。不同的热机中,往往采用不同的工质,这些工质对于热机中的热功转换有何影响? 怎样寻求理想的工质?

(3) 热力过程和热力循环。将各种热力装置中进行的热力过程和热力循环,概括、抽象、理想化为便于研究的理想过程和循环,然后再来分析计算该理想过程和循环,探讨影响热能与机械能相互转化的主要因素,寻找实现有效的热功转换的途径。

以上三方面的问题构成了工程热力学主要的研究对象。

近年来,随着热力工程实践的飞跃发展以及科学技术的突飞猛进,各种学科的相互渗透和相互促进,边缘学科的不断产生,工程热力学的研究领域已从传统的热功相互转换转向热能与各种其他形式能量的转换,其研究的范畴已涉及热化学、热泵、空气分离、化学精炼、高能激光、空气调节、生物工程、超导传输、太阳能利用、核发电等领域,昔日成熟的工程热力学正焕发出

新的青春,目前已发展为揭示热能与其他能量相互转换的基本规律、合理利用能源的一门学科。工程热力学是动力类专业(包括轮机工程)的一门主干技术基础课,无论是设计或改造热力设备,还是管理维修热力设备,都要运用其基本知识和计算方法。

热力学的研究有两种方法:一种是宏观的方法,即经典热力学;另一种是微观的方法,即统计热力学。经典热力学完全从宏观现象出发,以实践为基础。热力学的两个基本定律——热力学第一定律、热力学第二定律就是大量实践经验的总结,因此具有高度的普遍性和可靠性,它们是经典热力学的基本定律和基础。经典热力学的一切结论都是由这两个定律通过严密的逻辑推理而得到的,因此也具有高度的普遍性和可靠性。经典热力学的结构比较简单,只要利用几个基本概念就能进行热力学定律的推演,而这些基本概念较为直观,易于接受,理解也很容易,并且所涉及的变量较少,要求的数学知识也比较简单。由于主要依据是经验,没有人为的假设,所以其结果可靠、实用,在工程上得到广泛应用。但是这种宏观的研究方法,亦有其局限性和缺点。其缺点是不考虑物质的分子和原子的微观结构,也不考虑微粒的运动规律,因而尽管可以得到可靠的公式与结论,却不能说明其物理本质,而这一切可由热力学的另一分支——统计热力学来解决。

统计热力学是从物质内部的微观结构出发,借助物质的原子结构模型及描述物质微观行为的量子力学,利用统计方法、应用力学定律说明分子的随机运动。其特点是用统计方法研究大量分子杂乱无章运动的平均性质,故能从物质内部分子运动的微观机理,来更深刻地解释所观测到的宏观热现象的物理实质。微观方法要以繁杂的数学为工具,它的结论没有宏观方法那么可靠和直观,因此在应用上受到一定的限制。

还应指出的是,近年来,无论是工程热力学还是统计热力学,都随着计算机技术的应用与发展改进了热力学计算方法,一些过去认为复杂的问题变得简单了。如工程热力学编制各种工质热力性质表,可应用准确性高而复杂的实际气体状态方程式经计算机来计算,其参数范围大,是过去单依靠实验和人力计算所达不到的。又如在热机热力计算中,采用变比热容,并应用计算机来优化循环,计算出复杂循环的最佳参数。

根据前述,了解了工程热力学的研究对象和方法,就不难知道应该怎样学习本课程。

(1)明确本课程的研究对象和任务。本课程主要研究热能转化为机械能的规律、方法以及提高转化时的效率及热能利用的经济性的方法。

(2)掌握本课程的宏观研究方法,提高分析问题、解决问题的能力。在深刻认识热力学基本概念及掌握热力学基本定律的基础上,学会应用对复杂的实际工程问题进行抽象、概括、简化的方法。如内燃机、燃气轮机实际工作循环抽象为理想循环,工质的性质中采用理想气体、实际气体等概念。

(3)重视基本技能的训练。本课程是能源动力类专业的主要技术基础课,具有相当的工程实践性和应用性。解题的基本技能训练,不仅有助于深入理解工程热力学的基本理论和基本知识,而且还可以培养分析实际问题的能力和工程计算能力,是学习中的重要环节,应予以重视。除此之外,还应重视课程中的实验环节,加强实验技能的训练。

五、法定计量单位简介

工程热力学与其他学科一样,随着科学技术的发展,国际间的交流日益频繁,因而世界各国决定逐步采用统一的国际单位制,简称SI。我国于1984年2月27日由国务院颁布了“中华人民共和国法定计量单位”(简称法定单位),它以国际单位制为基础,同时适当选用了一些

非国际单位制的单位。

国际单位制包括 SI 单位、SI 词头和 SI 单位的十进倍数与分数单位三部分。

中华人民共和国法定计量单位包括：

- (1) 国际单位制的基本单位。
- (2) 国际单位制的辅助单位。
- (3) 国际单位制中具有专门名称的导出单位。
- (4) 国家选定的非国际单位制单位。
- (5) 由以上单位构成的组合形式单位。
- (6) 由词头和以上单位所构成的十进倍数和分数单位。

下面根据课程的内容和需要,将以上有关内容摘要介绍如下：

1. 国际单位制的基本单位及有关的导出单位

基本单位:基本单位共 7 个,如表 0-1 所列。

SI 基本单位

表 0-1

量的名称	单位名称	单位符号
长度	米	m
质量	千克(公斤)	kg
时间	秒	s
电流	安[培]	A
热力学温度	开[尔文]	K
物质的量	摩[尔]	mol
发光强度	坎[德拉]	cd

有关的导出单位:表 0-2 列出了与本书有关的一些主要导出单位。

SI 导出单位示例

表 0-2

量的名称	SI 导出单位			
	名称	符号	表示式	
			用 SI 单位	用 SI 基本单位
力,重力	牛[顿]	N	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
压力、压强、应力	帕[斯卡]	Pa	N/m^2	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
能[量],功,热量	焦[耳]	J	$N \cdot m$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
功率	瓦[特]	W	J/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
表面张力	牛[顿]每米	N/m	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
热流密度	瓦[特]每平方米	W/m^2	W/m^2	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-3}$
热容、嫡	焦[耳]每开[尔文]	J/K	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
比热容、比嫡	焦[耳]每千克开[尔文]	$J/(kg \cdot K)$	$J/(kg \cdot K)$	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
比能[量],比焓	焦[耳]每千克	J/kg	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$
摩尔体积	立方米每摩[尔]	m^3/mol	m^3/mol	$m^3 \cdot mol^{-1}$
摩尔热力学能,摩尔焓	焦[耳]每摩[尔]	J/mol	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
摩尔热容,摩尔嫡	焦[耳]每摩[尔]开[尔文]	$J/(mol \cdot K)$	$J/(mol \cdot K)$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$

2. SI 词头

SI 词头是用来构成十进倍数和分数单位的词头。常用国际单位制词头见表 0-3。

常用国际单位制词头

表 0-3

因 数	词头名称	词头符号
10^9	吉[咖](giga)	G
10^6	兆(mega)	M
10^3	千(kilo)	k
10^2	百(hecto)	h
10^1	十(deca)	da
10^{-1}	分(deci)	d
10^{-2}	厘(centi)	c
10^{-3}	毫(milli)	m
10^{-6}	微(micro)	μ

3. 国家选定的非国际单位制单位

与本书有关的国家选定的非国际单位制单位见表 0-4。

国家选定的非国际单位制单位

表 0-4

量的名称	单位名称	单位符号	换算关系和说明
时间	分	min	$1 \text{ min} = 60\text{s}$
	[小]时	h	$1 \text{ h} = 60\text{min} = 3600\text{s}$
	天[日]	d	$1 \text{ d} = 24\text{h} = 86400\text{s}$
平面角	[角]秒	($''$)	$1'' = (\pi/648000) \text{ rad}$
	[角]分	($'$)	$1' = 60'' = (\pi/10800) \text{ rad}$
	度	($^\circ$)	$1^\circ = 60' = (\pi/180) \text{ rad}$
旋转速度	转每分	r/min	$1 \text{ r/min} = (1/60) \text{ s}^{-1}$

4. 国际单位制单位与其他单位制单位的换算

表 0-5 列出了与本书有关的主要物理量单位间的换算关系。

主要单位换算表

表 0-5

压力		MPa (兆帕)	at (工程大气压)	lbf/in ² (磅力/英寸 ²)
	1 MPa =	1	10.1972	145.038
	1 at =	0.0980665	1	14.2233
	1 lbf/in ² =	0.0068947	0.070307	1
比体积		m ³ /kg (米 ³ /千克)	ft ³ /lb (英尺 ³ /磅)	
	1 m ³ /kg =	1	16.0185	
	1 ft ³ /lb =	0.062428	1	

比焓	$1 \text{ kJ/kg} =$ $1 \text{ kcal/kg} =$ $1 \text{ Btu/lb} =$	kJ/kg (千焦/千克)	kcal/kg (千卡/千克)	Btu/lb (英热单位/磅)
		1	0.238846	0.429923
		4.1868	1	1.80
		2.326	0.555556	1
比熵	$1 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) =$ $1 \text{ kcal}/(\text{kg} \cdot \text{K}) =$ $1 \text{ Btu}/(\text{lb} \cdot ^\circ\text{R}) =$	kJ/(kg·K) [千焦/(千克·开)]	kcal/(kg·K) [千卡/(千克·开)]	Btu/(lb·R) [英热单位/(磅·兰氏度)]
		1	0.238846	0.238846
		4.1868	1	1
		4.1868	1	1
比热容	$1 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) =$ $1 \text{ kcal}/(\text{kg} \cdot \text{K}) =$ $1 \text{ Btu}/(\text{lb} \cdot \text{R}) =$	kJ/(kg·K) [千焦/(千克·开)]	kcal/(kg·K) [千卡/(千克·开)]	Btu/(lb·R) [英热单位/(磅·兰氏度)]
		1	0.238846	0.238846
		4.1868	1	1
		4.1868	1	1
能量	$1 \text{ kJ} =$ $1 \text{ kcal} =$ $1 \text{ Btu} =$	kJ (千焦)	kcal (千卡)	Btu (英热单位)
		1	0.2388	0.9478
		4.1868	1	3.9682
		1.0550	0.2520	1
功率	$1 \text{ kW} =$ $1 \text{ 马力} =$ $1 \text{ Btu/h} =$	kW (千瓦)	马力	Btu/h (英热单位/时)
		1	1.3596	2.4121×10^3
		0.73549	1	2.5096×10^3
		2.93071×10^{-4}	3.98467×10^{-4}	1

思考题

1. 什么是工程热力学？其主要作用是什么？
2. 热能在人类发展史上及现在和将来所起的作用是什么？
3. 举出几种热力发动机的例子，通常它们各用在什么场合？
4. 我国的能源利用状况如何？工程热力学在其中能发挥什么作用？
5. 工程热力学的主要研究对象是什么？应该怎样学习工程热力学？
6. 宏观方法和微观方法各自的主要特点是什么？工程热力学的研究对象是什么？

第一章 基本概念

在热力学中,从能量转换的实际情况出发,经归纳和概括,建立了一些基本概念。本章围绕能量转换过程、工质状态及状态变化等内容,分别介绍热力系统、状态参数、平衡态、准平衡过程和可逆过程等基本概念。

第一节 热力系统

一、热力系统的定义

分析任何现象必须明确研究对象。在力学中,为了分析一个物体的受力状况,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,对热力设备进行热力学分析时,也常采用这种类似的方法,即将所要分析的对象从周围环境中分隔开来,这种人为分割开来的研究对象,称为热力系统,简称系统。如图 1-1 所示,气缸中虚线包围的气体就是我们的研究对象,则气体便是热力系统。系统外的物体称为外界,系统与外界之间的分界面称为边界,在图上边界习惯用虚线表示。边界可以是实际存在、假想的、固定的,也可以是运动的或变形的。图 1-1 中的边界就是气缸壁及活塞端部表面等实物边界构成的实际边界。图 1-2 所示以一燃气轮机作为系统,其边界包括两部分:一部分由真实的缸体壁面构成,另一部分则由假想的进出口处构成。系统与外界之间的作用总是通过分界面进行的,通常有三种形式,即:物质交换、功交换和热交换。所以热力系统与外界的相互作用,较之力学中的隔离体与外界间单纯力的相互作用要复杂得多。

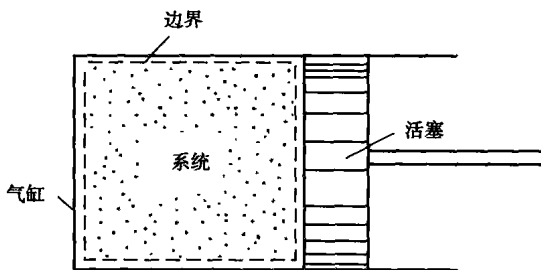


图 1-1

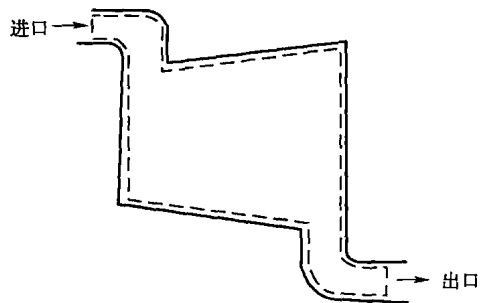


图 1-2

二、常见的热力系统

按系统与外界进行能量和质量交换的情况,常把热力系统分为以下几类:

1. 闭口系统

闭口系统是与外界没有物质交换的系统。在闭口系统中,其质量保持恒定不变,称为“控制质量”。如图 1-1 所示,内燃机的气缸可以视为闭口系统。